

TUGAS AKHIR - KS 141501

OPTIMASI PERANCANGAN SISTEM TENAGA HIBRIDA PADA BASE TRANSCEIVER STATION MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

REAULIA NADINE RACHMAT
NRP 5211 100 068

Dosen Pembimbing
Wiwik Anggraeni, S.Si, M.Kom

JURUSAN SISTEM INFORMASI
Fakultas Teknologi Informasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

FINAL PROJECT - KS 141501

DESIGN OPTIMIZATION OF HYBRID POWER SYSTEM ON BASE TRANSCEIVER STATION USING GENETIC ALGORITHM

**REALIA NADINE RACHMAT
NRP 5211 100 068**

**Supervisor
Wiwik Anggraeni, S.Si, M.Kom**

**DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS
Faculty of Information Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PERANCANGAN SISTEM TENAGA HIBRIDA PADA BASE TRANSCEIVER STATION MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer
pada

Jurusan Sistem Informasi
Fakultas Teknologi Informasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

REAULIA NADINE RACHMAT

NRP. 5211 100 068

Surabaya, 4 Juli 2015

KETUA

JURUSAN SISTEM INFORMASI



Dr. Eng. Febriliyan Samopa, S. Kom, M. Kom

NIP 19730219 199802 1 001

LEMBAR PERSETUJUAN

OPTIMASI PERANCANGAN SISTEM TENAGA HIBRIDA PADA BASE TRANSCEIVER STATION MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer
pada**

**Jurusan Sistem Informasi
Fakultas Teknologi Informasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**REAULIA NADINE RACHMAT
NRP. 5211 100 068**


Disetujui Tim Penguji: Tanggal Ujian : 7 Juli 2015

Periode Wisuda : September 2015

Wiwik Anggraeni S.Si, M.Kom


(Pembimbing I)

Renny Pradina, S.T, M.T.


(Penguji I)

Amalia Utamima, S.Kom, MBA


(Penguji II)

OPTIMASI PERANCANGAN SISTEM TENAGA HIBRIDA PADA BASE TRANSCEIVER STATION MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

Nama Mahasiswa : REAULIA NADINE RACHMAT
NRP : 5211 100 068
Jurusan : SISTEM INFORMASI FTIF-ITS
Dosen Pembimbing: WIWIK ANGGRAENI S.Si, M.Kom

ABSTRAK

Pertumbuhan pengguna telepon seluler semakin meningkat setiap tahunnya, selama tahun 2013 tercatat 6,4 juta pelanggan baru terdaftar dalam data histori perusahaan Telkomsel. Dengan jumlah pelanggan selular yang sangat besar penghematan energi yang dilakukan pada BTS menjadi upaya yang sangat berarti dalam rangka penghematan biaya dan mengurangi pemanasan global. Sistem kelistrikan pada BTS di daerah-daerah kepulauan masih menggunakan generator listrik berbahan bakar fosil. Penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar di pembangkit tenaga listrik selain menghabiskan biaya yang tidak sedikit, juga dapat menimbulkan polusi udara. Sehingga dibutuhkan solusi energi alternatif yang tidak hanya murah tetapi juga ramah lingkungan. Penerapan sistem tenaga surya sebagai sumber energi alternatif akan memberikan dampak yang besar pada penghematan bahan bakar fosil. Namun dalam penerapan sistem tenaga surya pada BTS dibutuhkan biaya investasi yang tidak sedikit. Untuk itu dibutuhkan perancangan konfigurasi sistem tenaga surya yang dapat memenuhi kebutuhan listrik BTS namun

tetap memperhatikan biaya konfigurasi penggunaan sistem yang paling menguntungkan.

Tugas akhir ini menggunakan pendekatan Algoritma Genetika untuk menyelesaikan masalah desain konfigurasi tenaga hibrida yang mana menggabungkan penggunaan energi daur ulang dari panel surya, baterai, pln dan generator diesel sebagai tenaga cadangan. Model optimasi ini memiliki dua tujuan, yaitu meminimalkan biaya penggunaan energi tahunan yang harus dibayarkan oleh perusahaan dan meminimalkan emisi karbon yang dihasilkan sistem. Dari hasil optimasi didapatkan nilai proporsi pembagian beban listrik pada masing-masing sistem dan ukuran komponen panel surya serta baterai yang dibutuhkan pada sistem tenaga hibrida untuk sumber catu daya listrik BTS. Dengan menerapkan sistem tenaga hibrida maka perusahaan dapat melakukan penghematan pembelian bahan bakar hingga 100 % jika menerapkan solusi konfigurasi L (emisi terendah), 98,3 % jika solusi konfigurasi C (seimbang) dan 95 % jika solusi konfigurasi R (biaya terendah).

Kata kunci : *Algoritma Genetika, Beban listrik, BTS, Jaringan seluler, Konsumsi daya listrik, Optimasi, Sistem energi surya*

DESIGN OPTIMIZATION OF HYBRID POWER SYSTEM ON BASE TRANSCEIVER STATION USING GENETIC ALGORITHM

Nama Mahasiswa : REAULIA NADINE RACHMAT
NRP : 5211 100 068
Jurusan : SISTEM INFORMASI FTIF-ITS
Dosen Pembimbing: WIWIK ANGGRAENI S.Si, M.Kom

ABSTRACT

The number of mobile phone users is increasing every year. During 2013, based on company history data, Telkomsel recorded there is 6.4 million new subscribers registered. With the enormous number of cellular subscriber, energy savings on BTS become a very significant effort in order to save costs and reduce global warming. The BTS electrical system in remote islands are still using diesel generators. Fossil energy, diesel in this case, use as fuel in power plants not only spent significant cost, but also can cause air pollution. So we need alternative energy solutions that are not only cheap but also environmentally friendly. The application of solar systems as an alternative energy source will have a great impact on fossil fuel savings. However, in the application of solar power systems in the BTS the investment cost is not small. In order to do that requires designing solar power system configurations that can meet the electricity needs of the BTS but still consider the cost of the configuration of the most profitable use of the system.

This final project usinng Genetic algorithms approach to solve problems about designing hybrid power configuration which combines the use of renewable energy from solar panels, batteries,

PLN and diesel generators as backup power. This optimization model has two objectives, namely to minimize the cost of annual energy usage to be paid by the company and minimize the carbon emissions generated by the system. From the optimization results obtained value of burden-sharing proportion of electricity in each system and the size of the solar panel and battery components required in hybrid power systems for electric power supply source BTS. By applying a hybrid power system, the company can reduce the using of diesel fuel up to 100% if applying the solution configuration L (lowest emissions), 98.3% if the solution configuration C (balanced) and 95% if the R configuration solution (lowest costs).

Keyword : *Genetic Algorithms, power loads, base stations, cellular networks, electric power consumption, optimization, solar energy systems*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullah wabarakatuh.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul:

“OPTIMASI PERANCANGAN SISTEM TENAGA HIBRIDA PADA BASE TRANSCEIVER STATION MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA”

yang merupakan salah satu syarat kelulusan pada Jurusan Sistem Informasi, Fakultas Teknologi Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, diantaranya :

1. Bapak Andon sebagai manajer Departemen *Core and Power Performance Assurance*. Terima kasih telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian di Perusahaan Telekomunikasi Seluler wilayah Jawa Timur.
2. Bapak Ahmad Fathor dan Mas Trimman selaku Staff Departemen *Core and Power Performance Assurance*. Terima kasih telah mengizinkan dan membantu penulis dalam pengambilan data penelitian dan memberikan pengetahuan baru di bidang telekomunikasi dan kelistrikan BTS
3. Bapak Dr. Eng. Febriliyan Samopa, S.Kom., M.Kom., selaku Kepala Jurusan Sistem Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

4. Bapak Tony Dwi Susanto, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Sistem Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
5. Ibu Wiwik Anggraeni, S.Si, M.Kom., selaku Dosen Pembimbing tugas akhir penulis. Terima kasih atas motivasi, bimbingan dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Ibu Renny Pradina K dan Ibu Amalia Utamima selaku dosen penguji yang telah memberi kritik dan saran sehingga mampu memperbaiki tugas akhir ini.
7. Arif Wibisono, S.Kom, M.Kom selaku dosen wali Penulis pada saat menempuh pendidikan di Jurusan Sistem Informasi ITS.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka saran dan kritik yang membangun dari seluruh pihak sangat diharapkan. Akhir kata, penulis berharap bahwa tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak.

Wassalamualaikum warahmatullah wabarakatuh.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SEGMENT PROGRAM.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Pengerjaan Tugas Akhir	4
1.4 Tujuan Tugas Akhir	4
1.5 Manfaat Tugas Akhir	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
1.7 Relevansi.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9

2.1	Uraian Permasalahan.....	9
2.2	Sistem Komunikasi Selular	12
2.3	Base Transceiver Station.....	14
2.4	Konsumsi Energi Listrik pada BTS	15
2.5	Potensi Energi Surya.....	17
2.6	Perencanaan Sistem Tenaga Hibrida pada BTS.....	18
2.6.1	Teknologi Tenaga Surya Fotovoltaik	19
2.6.2	Baterai Surya	22
2.6.3	Generator Listrik	23
2.6.4	PLN	24
2.7	<i>Annual Cost of Energy (ACoe)</i>	26
2.7.1	Biaya Energi (<i>COE</i>) Sistem PV	26
2.7.2	Biaya Energi (<i>COE</i>) Sistem PLN.....	28
2.7.3	Biaya Energi (<i>COE</i>) Sistem Generator Diesel	29
2.8	Algoritma Genetika.....	30
2.8.1	Komponen Algoritma Genetika	31
2.8.2	Operator Algoritma Genetika	32

2.8.3	<i>Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)</i>	32
2.8.4	Pendekatan Algoritma Genetika dalam Optimasi Sistem Tenaga Hibrida	34
BAB III METODOLOGI		37
3.1	Identifikasi Masalah	38
3.2	Studi Literatur	38
3.3	Pengumpulan Data	38
3.4	Pengolahan Data dan Analisis	39
3.5	Formulasi Model dengan Algoritma Genetika	39
3.6	Verifikasi dan Validasi Model	40
3.7	Pemilihan Solusi Konfigurasi	40
3.8	Penarikan Kesimpulan dan Saran	41
3.9	Pembuatan Laporan Tugas Akhir	41
BAB IV PERANCANGAN		43
4.1	Formulasi Model	43
4.1.1	Penentuan Variabel Keputusan	43
4.1.2	Perumusan Fungsi Tujuan	45
4.1.3	Perumusan Batasan Model	47

4.2	Desain Model Algoritma Genetika	49
4.2.1	Inisialisasi Data	50
4.2.2	Representasi Kromosom.....	54
4.2.3	Inisialisasi Populasi	55
4.2.4	Evaluasi Individu.....	55
4.2.5	Rekombinasi dan <i>Sorting</i>	58
4.2.6	Seleksi Orang Tua (<i>Parent</i>).....	58
4.2.7	Operasi Pindah Silang	59
4.2.8	Operasi Mutasi	60
BAB V IMPLEMENTASI		61
5.1	Implementasi Model Algoritma Genetika Multi-Obyektif pada Program Matlab	61
5.1.1	EvaluasiIndividu.m.....	61
5.1.2	<i>Running</i> Algoritma Menggunakan Jendela Optimasi	66
5.1.3	<i>Running</i> Algoritma Menggunakan File Main.m ..	78
BAB VI HASIL DAN PEMBAHASAN.....		81
6.1	Lingkungan Uji Coba.....	81

6.2	Skenario Uji Coba.....	82
6.3	Hasil Uji Coba	83
6.3.1.	Perbandingan Total Biaya ($ACoe$) dan Emisi Karbon (CE) Berdasarkan Parameter Nilai Populasi	84
6.3.2.	Perbandingan Total Biaya ($ACoe$) dan Emisi Karbon (CE) Berdasarkan Parameter Nilai Probabilitas Pindah Silang	87
6.4	Hasil Optimasi dengan Algoritma Multi-Obyektif	94
6.4.1	Optimasi pada Skenario Kondisi Normal.....	94
6.4.2	Optimasi pada Skenario Kondisi Minimal	96
6.5	Validasi Model.....	97
6.6	Analisis Hasil Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida ...	100
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN		105
7.1	Kesimpulan	105
7.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA.....		109
RIWAYAT PENULIS.....		115

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Variabel Keputusan	45
Tabel 4. 2 Rata-rata Insolasi Harian Matahari.....	51
Tabel 4. 3 Tipe Kapasitas Panel Surya (PV)	52
Tabel 4. 4 Tipe Kapasitas Baterai Surya	53
Tabel 4. 5 Parameter Ekonomi	53
Tabel 4. 6 Parameter Emisi Lingkungan	54
Tabel 6. 1 Perangkat Keras Lingkungan Uji Coba.....	81
Tabel 6. 2 Perangkat Lunak Lingkungan Uji Coba	82
Tabel 6. 3 Uji Coba dengan Parameter $Npop = 50, 75, 100$	84
Tabel 6. 4 Perubahan Parameter nilai Pc pada $Npop = 100$	88
Tabel 6. 5 Solusi Ekstrim Optimasi pada Skenario Hari Terang.....	95
Tabel 6. 6 Solusi Ekstrim Optimasi Menggunakan Algoritma Genetika Multi-Obyektif	97
Tabel 6. 7 Perbandingan Hasil Optimasi $gamultiobj$ dengan QM	99
Tabel 6. 8 Hasil Perhitungan <i>Error Variance</i>	99

Tabel 6. 9 Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida Kondisi Normal100

Tabel 6. 10 Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida Kondisi Minimal100

Tabel 6. 11 Konfigurasi Sistem Tenaga Listrik Tanpa Panel Surya102

Tabel 6. 12 Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Diesel102

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bentuk Sel Sistem Komunikasi	13
Gambar 2. 2 Rangkaian Jaringan Radio Seluler.....	15
Gambar 2. 3 Kebutuhan Listrik dalam <i>Base Station</i>	16
Gambar 2. 4 Diagram Sistem Tenaga Hibrida pada BTS Pulau Bawean Tambak	19
Gambar 2. 5 Struktur Sel Surya.....	19
Gambar 2. 6 Kapasitas Terpasang Pembangkit Sistem Jawa-Bali hingga Tahun 2013	25
Gambar 2. 7 <i>Tariff Adjustment</i> PLN Bulan Juni 2015	29
Gambar 2. 8 Diagram Alur Algoritma Genetika pada Penentuan Ukuran Sistem Energi Surya	36
Gambar 3. 1 Diagram Alur Pengerjaan Tugas Akhir	37
Gambar 4. 1 Diagram Sumber Catu Daya Listrik BTS Pulau Bawean Tambak	44
Gambar 4. 2 Diagram Alur NSGA-II	49
Gambar 4. 3 Representasi Kromosom.....	55
Gambar 4. 4 Tahapan <i>Fast Non-Dominated Sorting</i>	56
Gambar 4. 5 <i>Crowding Distance</i>	57

Gambar 4. 6 Tahapan Menghitung Nilai <i>Crowding Distance</i>	57
Gambar 4. 7 Proses <i>Sorting</i> NSGA-II	58
Gambar 4. 8 Contoh Proses Pindah Silang.....	60
Gambar 5. 1 Mengakses <i>Optimization Toolbox</i>	67
Gambar 5. 2 Memanggil <i>Toolbox gamultiobj</i>	67
Gambar 5. 3 Jendela <i>Optimization Tool</i>	68
Gambar 5. 4 Kolom <i>Problem</i>	69
Gambar 5. 5 Kolom <i>Constraints</i>	70
Gambar 5. 6 Kolom <i>Run Solver and View Results</i>	70
Gambar 5. 7 Kolom <i>Population</i>	71
Gambar 5. 8 Kolom <i>Selection</i>	72
Gambar 5. 9 Kolom <i>Reproduction</i>	72
Gambar 5. 10 Kolom <i>Mutation</i>	73
Gambar 5. 11 Kolom <i>Crossover</i>	73
Gambar 5. 12 Kolom <i>Migration</i>	74
Gambar 5. 13 Kolom <i>Multiobjective Problem Settings</i>	74
Gambar 5. 14 Kolom <i>Hybrid Function</i>	75

Gambar 5. 15 Kolom Stopping Criteria	76
Gambar 5. 16 Kolom <i>Plot Function</i>	76
Gambar 5. 17 Kolom <i>Output Function</i>	77
Gambar 5. 18 Kolom <i>Display to Command Window</i>	77
Gambar 5. 19 Kolom <i>User Function</i>	78
Gambar 6. 1 Grafik Persebaran $N_{pop} = 50$	85
Gambar 6. 2 Grafik Persebaran $N_{pop} = 75$	85
Gambar 6. 3 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$	86
Gambar 6. 4 Perbandingan Persebaran antara $N_{pop} = 50, 75$ & 100	86
Gambar 6. 5 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,1$	89
Gambar 6. 6 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,2$	89
Gambar 6. 7 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,3$	90
Gambar 6. 8 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,4$	90
Gambar 6. 9 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,5$	91
Gambar 6. 10 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,6$	91
Gambar 6. 11 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,7$	92
Gambar 6. 12 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,8$	92

Gambar 6. 13 Grafik Persebaran Npop = 100 dan Pc = 0,9	93
Gambar 6. 14 Perbandingan Persebaran Npop = 100 dan Pc = 0,1-0,9	93
Gambar 6. 15 Grafik <i>Best of Pareto Front</i> Skenario Kondisi Normal	95
Gambar 6. 16 Grafik <i>Best of Pareto Front</i> Skenario Kondisi Minimal	96
Gambar 6. 17 Validasi Model dengan QM.....	98
Gambar 6. 18 Hasil <i>Linear Programming</i> QM	98
Gambar 6. 19 Grafik Perbandingan Emisi Karbon.....	103

DAFTAR SEGMENT PROGRAM

Segment Program 5. 1 Input Data Awal (1)	62
Segment Program 5. 2 Input Data Awal (2)	63
Segment Program 5. 3 Rincian Biaya Sistem Tenaga Hibrida (1)	64
Segment Program 5. 4 Rincian Biaya Sistem Tenaga Hibrida (2)	65
Segment Program 5. 5 Fungsi Tujuan	66
Segment Program 5. 6 File main.m	79

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bagian pendahuluan akan dibahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan, tujuan, dan manfaat Tugas Akhir.

1.1 Latar Belakang

Komunikasi menjadi aspek penting dalam kehidupan sosial dalam masyarakat. Sistem yang memberikan fasilitas layanan jasa telekomunikasi bagi pelanggan bergerak disebut sebagai sistem komunikasi seluler. Dengan lahirnya sistem komunikasi selular ini memberikan dampak positif yang signifikan pada masyarakat. Kemudahan berkomunikasi yang tidak lagi dibatasi oleh jarak menjadi keunggulan utama yang diberikan sistem komunikasi tersebut. Maka tidak heran bahwa sekarang telepon seluler telah menjadi kebutuhan pokok atau primer di masyarakat [1]. Hal itulah yang mendasari perkembangan yang begitu pesat dalam hal teknologi di telepon selular, baik dari sisi kualitas fitur telepon selular itu sendiri dan infrastruktur jaringan telekomunikasi yang dikelola oleh perusahaan operator sistem komunikasi. Menurut data dari Telkom Indonesia tercatat selama tahun 2013, Telkomsel sebagai anak perusahaan Telkom Indonesia mendapatkan pelanggan baru sebanyak 6,4 juta pelanggan dan hal itu artinya meningkat 5,1 % dari tahun sebelumnya [2].

Salah satu tantangan utama bagi masa depan teknologi informasi dan komunikasi adalah pengurangan konsumsi daya listrik dalam jaringan telekomunikasi. Industri Telekomunikasi (ICT) menghabiskan sekitar 900 M KWh setiap tahunnya atau setara dengan 10% dari pemakaian listrik di dunia [3]. Dimana penyumbang terbesar adalah

industri telekomunikasi seluler dan sekitar 60-80% pemakaian listrik dibebankan pada operasional *Base Transceiver Station* (BTS) [4]. BTS merupakan komponen penting dalam infrastruktur jaringan telekomunikasi. Maka dari itu dengan melakukan efisiensi pemakaian energi listrik pada BTS dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional perusahaan.

Terdapat tiga solusi penanganan optimasi konsumsi listrik, yaitu pengaturan penonaktifan elemen (*switching off elements*) ketika kebutuhan trafik rendah, mengurangi beban listrik dan pemilihan komponen yang ramah lingkungan atau berdaya rendah [5]. Dari ketiga strategi tersebut, penggunaan teknologi ramah lingkungan menjadi salah satu alternatif yang dirasa paling cocok untuk diterapkan pada BTS milik perusahaan Telkomsel Indonesia yang berada di wilayah kepulauan atau terpencil. Penerapan sistem tenaga surya sebagai sumber energi alternatif akan memberikan dampak yang besar pada penghematan bahan bakar fosil. Dikarenakan pada daerah terpencil, dimana pasokan tenaga listrik dari PLN masih sangat terbatas dan tidak merata di setiap wilayah, telah memaksa mereka untuk menggunakan generator diesel (genset) guna memperoleh sumber daya listrik. Penggunaan genset mengakibatkan biaya operasional sangat tinggi untuk pengadaan bahan bakar.

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam penerapan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Mahmoud dan Ibrik (2006) meneliti mengenai penggunaan sistem tenaga surya (*photovoltaic*) pada daerah pedalaman di Palestina memberikan keuntungan ekonomis dan memungkinkan untuk dibangun dibandingkan dengan

penggunaan generator diesel dan listrik tegangan tinggi dari penyedia listrik setempat [6]. Bala dan Siddique (2009), berdasarkan studi lapangan yang telah dilakukan di Bangladesh, menyatakan bahwa pembiayaan pembangunan pembangkit listrik tenaga hibrida PV-diesel sebagian besar akan dihabiskan pada pengadaan baterai dan panel surya. Dari hal itu maka sistem tenaga hibrida ini akan cocok apabila diterapkan pada daerah dengan akses yang terbatas (*remote area*), dimana listrik masih menjadi hal yang langka dan sangat dibutuhkan. [7]

Dalam tugas akhir ini mengambil topik optimasi BTS seperti penelitian terdahulu yang telah disebutkan sebelumnya. Pada jaringan seluler ini akan diadaptasi penggunaan sistem tenaga hibrida dimana menggabungkan penggunaan energi daur ulang dari panel surya, baterai, pasokan PLN yang terbatas dan genset sebagai tenaga cadangan. Dengan menggunakan pendekatan Algoritma Genetika, tugas akhir ini akan mencari konfigurasi sistem tenaga surya, berupa kombinasi pembagian beban listrik antar sumber catu daya listrik, yaitu panel surya, baterai, aliran listrik PLN dan genset, dimana dengan tujuan utama meminimalkan nilai biaya operasional tahunan penggunaan sistem dan mengurangi emisi karbondioksida (CO_2) yang dihasilkan. Tujuan besar yang ingin dicapai oleh tugas akhir ini adalah menghemat penggunaan genset berbahan bakar fosil pada BTS, sehingga diharapkan penerapan sistem mendukung program *Green ICT* dan turut membangun Indonesia yang bebas polusi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Seperti apakah model Algoritma Genetika yang sesuai dengan kondisi BTS?
2. Seperti apakah konfigurasi sistem tenaga hibrida yang dapat menghemat penggunaan bahan bakar fosil pada BTS namun memenuhi kebutuhan beban BTS?

1.3 Batasan Pengerjaan Tugas Akhir

Berdasarkan permasalahan yang disebutkan diatas, batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Data yang digunakan berasal dari Perusahaan Telekomunikasi Seluler wilayah Jawa Timur
2. Wilayah dalam proses optimasi dilakukan adalah pada *site* BTS Pulau Bawean Tambak, Gresik, Jawa Timur
3. Konfigurasi yang dihasilkan terdiri dari kombinasi jumlah beban listrik yang akan dicukupi oleh masing-masing sumber daya listrik, yaitu panel surya (PV) + baterai, aliran PLN dan generator diesel.
4. Jangka waktu yang digunakan dalam pemodelan adalah 1 tahun

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk memperoleh model dan konfigurasi sistem tenaga surya yang menggunakan *green energy* dengan biaya seminimal mungkin sehingga dapat mengurangi konsumsi listrik dan emisi karbon pada BTS namun tetap memenuhi kebutuhan pelanggan.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Perusahaan dapat mengetahui konfigurasi sistem tenaga surya yang cocok dengan keadaan BTS yang dimiliki perusahaan sehingga dapat digunakan sebagai bahan perencanaan pengembangan BTS
2. Sebagai masukan bagi perusahaan untuk penggunaan energi alternatif yang ramah lingkungan dalam mendukung program *Green Technology*

1.6 Sistematika Penulisan

Buku tugas akhir ini disusun berdasarkan pedoman pembuatan buku tugas akhir yang telah ditetapkan. Pada buku tugas ini akhir tersusun dari enam bab yang saling berkaitan satu sama lain yang akan dijelaskan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan hal-hal dasar mengenai tugas akhir ini. Hal-hal yang dijelaskan di sini antara lain: latar belakang pengerjaan tugas akhir, rumusan permasalahan pengerjaan tugas akhir, batasan permasalahan pengerjaan tugas akhir, tujuan pengerjaan tugas akhir, manfaat dari pengerjaan tugas akhir, dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan pustaka dan teori-teori yang mendukung dalam pengerjaan tugas akhir. Teori-teori tersebut antara lain mengenai Algoritma Genetika Multi-Obyektif, perancangan sistem tenaga surya, dan *Base Transceiver Station*.

BAB III METODE Pengerjaan Tugas Akhir

Pada bab ini akan dibahas mengenai langkah-langkah yang dilakukan oleh penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini. Kegiatan atau proses akan dilambangkan dalam suatu konsep alur kerja yang terstruktur dengan menampilkan masukan dan keluaran dari masing-masing kegiatan atau proses yang dilakukan.

BAB IV PERANCANGAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai perancangan pengambilan data dan implementasi algoritma genetika diajukan oleh penulis. Dalam bab ini juga akan dibahas bagaimana penelitian akan dilakukan, subjek dan objek penelitian serta srategi pelaksanaannya.

BAB V IMPLEMENTASI

Pada bab ini akan dilakukan eksekusi dari perancangan penelitian yang telah ditentukan sebelumnya. Selain itu juga dibahas hambatan dan rintangan selama proses pelaksanaan penelitian berlangsung.

BAB VI HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini penulis akan menampilkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Selain itu pada bab ini juga dilakukan analisis dan evaluasi dari data yang dihasilkan.

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN

Bab penutup ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil pengerjaan Tugas Akhir dan rekomendasi serta saran untuk pengembangan penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil penelitian ini memiliki keterkaitan dengan bidang keilmuan *Decision Support System* khususnya optimasi dan kecerdasan bisnis pada laboratorium Sistem Pendukung Keputusan. Dimana mata kuliah yang berkaitan dengan penelitian ini adalah Manajemen Sains Lanjut dan Kecerdasan Bisnis.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan pustaka dari tugas akhir. Bab ini berisi dasar teori yang mendukung tugas akhir sehingga ada dasar teori yang cukup kuat sebagai pendukung pelaksanaan tugas akhir.

2.1 Uraian Permasalahan

PT. Telekomunikasi Seluler merupakan perusahaan operator telekomunikasi milik Indonesia. Dengan kepemilikan saham oleh Telkom Indonesia sebesar 65%. Sebagai operator selular nomor 6 terbesar di dunia dalam hal jumlah pelanggan, Telkomsel merupakan pemimpin pasar industri telekomunikasi di Indonesia yang kini dipercaya melayani lebih dari 139 juta pelanggan pada tahun 2014. Saat ini Telkomsel memiliki lebih dari 84.000 BTS yang menjangkau sekitar 98% wilayah populasi di Indonesia. Serta telah mengembangkan Floating BTS yang dipasang di 16 kapal PELNI untuk menjangkau kebutuhan akses pelanggannya ketika berpergian melalui jalur laut. Pada tahun 2008, Telkomsel mulai mengembangkan penggunaan energi terbarukan untuk BTS dan diklaim menjadi pelopor pertama di Asia [8].

Data dari Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM) tahun 2002 menunjukkan bahwa besarnya cadangan minyak bumi Indonesia adalah 5×10^9 SBM. Cadangan gas bumi sebesar 90 TSCF (Tera Standard Cubic Feet), sedangkan batubara mempunyai cadangan sebesar 5×10^9 TCE (Ton Coal Equivalent). Bila ditinjau dari rasio cadangan (Reserve to Production Ratio - R/P), batubara mempunyai R/P tertinggi, yaitu sekitar 50 tahun, disusul gas bumi dan minyak bumi yang masing-masing

mempunyai R/P sekitar 30 tahun dan 10 tahun. Besarnya R/P tersebut didasarkan pada cadangan dan produksi tahun 2002. Sebagian besar dari produksi gas bumi dan batubara masih diekspor daripada dimanfaatkan di dalam negeri. Pada tahun 2002, gas bumi yang diekspor mencapai lebih dari 50 persen dari produksinya, demikian pula ekspor batubara adalah 75 persen dari produksinya. Dengan mempertimbangkan kondisi ini pemerintah membuat kebijakan untuk secara bertahap mengganti penggunaan minyak bumi dengan bahan bakar lain khususnya untuk pembangkit tenaga listrik [9]

Selain itu penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar di pembangkit tenaga listrik dapat menimbulkan polusi udara yang dihasilkan dari proses pembakaran atau konversi. Polusi ini dapat berupa SO₂, NO₂, CO₂, VHC (Volatile Hydrocarbon) dan SPM (Suspended Particulate Matter). Meningkatnya ketergantungan pada energi fosil (terutama batubara) dalam bauran energi nasional dan dengan semakin banyaknya penebangan hutan telah menempatkan Indonesia menjadi salah satu negara penghasil Gas Rumah Kaca (GRK) terbesar di dunia setelah Amerika Serikat, Cina dan India. Sebuah studi oleh Energy Institute of Japan memperkirakan emisi karbon Indonesia adalah sebesar 1,3% dari total emisi CO₂ dunia yang totalnya mencapai 26.693 juta mt. Pada tahun yang sama (2008), emisi GRK secara total dari pembangkit listrik PLN saja sudah 118.646 ktons CO₂. Pemerintah melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. KEP-13/MENLH/3/1995 telah mengeluarkan peraturan standar emisi untuk pembangkit tenaga listrik. Peraturan ini mengatur batas maksimum dari semua emisi yang dikeluarkan, yaitu batas maksimum untuk partikel sebesar

150 mg/m³, emisi SO₂ sebesar 750 mg/m³, emisi NO₂ sebesar 850 mg/m³, dan tingkat opasitas sebesar 20 %. Dengan adanya batas maksimum pengeluaran emisi tersebut, menyebabkan pemilihan teknologi pembangkit tenaga listrik perlu mempertimbangkan penggunaan teknologi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan [10].

Sistem kelistrikan pada BTS di daerah-daerah kepulauan dipasok oleh genset. Penggunaan genset dirasa mengakibatkan besarnya biaya operasional yang digunakan untuk membeli bahan bakar genset. Disamping itu bahan bakar fosil yang digunakan pada genset, selain jumlahnya akan semakin menipis setiap tahunnya serta dapat mencemari lingkungan karena menyumbang emisi karbon yang tidak baik bagi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif sumber energi lain. Dari data yang telah disebutkan diatas maka penggunaan teknologi terbarukan yang ramah lingkungan dianggap menjadi salah satu alternatif utama untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang semakin terbatas. BTS sebagai salah satu infrastruktur utama dari perusahaan operator telekomunikasi menghabiskan energi listrik hingga 80% dari total penggunaan energi perusahaan tersebut, serta menyumbang emisi karbon hingga 60%. Dengan menggunakan energi yang lebih ramah lingkungan perusahaan dapat menerapkan Green ICT dan menghemat biaya operasional dalam jangka panjang.

Tugas akhir ini akan mengajukan penggunaan sistem tenaga hibrida pada BTS di wilayah pulau-pulau terpencil dimana pasokan listrik dari PLN masih terbatas. Sistem tenaga surya dipilih karena besarnya potensi insolasi sinar harian matahari di negara kita. Indonesia merupakan negara tropis dimana matahari bersinar hampir sepanjang

tahun, sehingga memberikan keuntungan dalam menjaga kestabilan suplai energi listrik ke BTS.

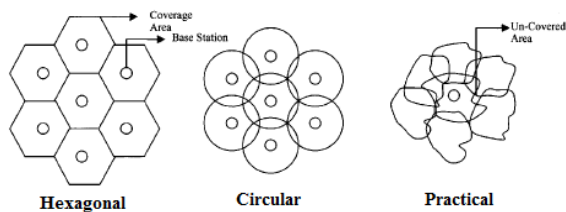
Penerapan sistem tenaga hibrida pada BTS akan menghabiskan dana yang tidak sedikit khususnya pada pengadaan panel surya dan baterai, sehingga dalam perancangannya perlu dilakukan secara teliti. Penghitungan konfigurasi sistem tenaga surya pada masing-masing BTS sejauh mungkin dilakukan secara optimal dengan prinsip biaya penyediaan listrik terendah (*least cost*), dengan tetap memenuhi tingkat keandalan yang wajar dalam industri tenaga listrik. Biaya penyediaan terendah dicapai dengan meminimalkan total biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan. Biaya penyediaan listrik terdiri dari biaya investasi, biaya bahan bakar, biaya operasi dan pemeliharaan. Model Algoritma Genetika yang akan dikerjakan dalam tugas akhir ini akan mencari solusi konfigurasi yang paling optimal dengan biaya dan emisi karbon yang seminimal mungkin sehingga menguntungkan perusahaan.

2.2 Sistem Komunikasi Selular

Sistem komunikasi seluler merupakan sistem yang digunakan untuk memberikan layanan jasa telekomunikasi bagi pelanggan bergerak, disini disebut sebagai telepon seluler. Dinamakan sebagai sistem cellular karena daerah layanannya dibagi-bagi menjadi area yang kecil-kecil yang disebut sel (cell). Pemancar sinyal atau base station dapat melingkupi beberapa sel. Terdapat beberapa keuntungan dari penggunaan jaringan seluler, diantaranya adalah peningkatan kapasitas penurunan penggunaan daya listrik, dan jangkauan area yang lebih baik. Sistem seluler ini

memungkinkan penggunaan frekuensi ulang pada wilayah yang lain, sehingga jutaan orang mampu berkomunikasi menggunakan telepon seluler secara bersamaan tanpa khawatir akan terjadinya pemutusan hubungan.

Penggambaran sel dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu heksagonal, *circular* (lingkaran), dan *practical*. Sebagai gambaran bentuk dapat dilihat pada Gambar 2.1. Bentuk lingkaran atau circular adalah bentuk ideal dari area yang dapat dicakupi dari sinyal yang dipancarkan oleh base station antenna. Namun bentuk lingkaran sendiri dapat dikategorikan sedikit boros karena terdapat area yang dilingkup lebih dari satu sel hal ini dapat menyebabkan pemborosan energi. Sedangkan pada bentuk practical, yang menggambarkan keadaan di dunia nyata, dimana sel berbentuk tidak teratur dan memungkinkan adanya daerah yang tidak terlayani (*un-covered*). Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor dari pemancar sinyal itu sendiri dan kondisi lingkungan. Heksagonal merupakan bentuk artifisial atau model dari penggambaran sebuah sel, dimana setiap sel saling berdekatan tidak menimbulkan gap atau celah [11].



Gambar 2. 1 Bentuk Sel Sistem Komunikasi

Dari sisi ukuran terdapat beberapa macam ukuran sel pada jaringan seluler, yaitu sel makro, mikro, *pico* dan *umbrella*. Area cakupan dari masing-masing sel bervariasi

tergantung dari implementasi terhadap daerah yang dicakupinya masing-masing. Sel makro dapat ditemui ketika antena BTS terpasang pada bangunan atau atap gedung yang tinggi. Sel mikro adalah sel yang tinggi antenanya dibawah atap gedung. Penggunaan sel mikro biasanya dibangun pada daerah perumahan. Sedangkan sel *pico* berukuran yang kecil dimana luasnya hanya beberapa m². Untuk sel *umbrella* biasanya hanya digunakan untuk menjangkau sel yang kecil dan mengisi kekosongan diantara sel-sel kecil tersebut. Jangkauan sel dipengaruhi oleh kondisi pemasangan antena yaitu tinggi kedudukan, gain antena dan propagasi dari beberapa ratus meter hingga puluhan kilometer. Jangkauan terjauh dari sistem seluler adalah sekitar 35 km atau 22 mil.

2.3 Base Transceiver Station

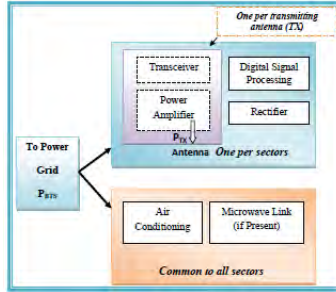
Gelombang komunikasi seluler terhubung melalui suatu perangkat pemancar yang disebut sebagai Base Transceiver Station. BTS disebut juga sebagai modem radio. Perangkat Base Transceiver Station (BTS) menyediakan koneksi jaringan dari suatu user equipment (UE) ke dalam suatu jaringan komunikasi melalui perantara udara [12]. Perangkat UE inilah merupakan perangkat yang dapat berkomunikasi melalui jaringan UMTS.

Penghubung antara sejumlah BTS dan MSC adalah BSC (Base Station Controller). Tiap BSC mengontrol satu atau lebih BTS. BSC dihubungkan ke beberapa BTS melalui Abis-interface [11]. BSC berfungsi untuk menjaga sentral dan mengatur subsistem, sama dengan BSS (Base Station Subsystem). BSS terdiri dari BSC itu sendiri dan BTS yang terhubung seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.

TRx (Transmitter and Receiver) bertanggung jawab untuk transmisi dan penerima sinyal radio. Untuk menghitung kapasitas suatu BTS dalam melayani pelanggan, maka kita harus memperhatikan berapa jumlah TRx yang digunakan dalam tiap sektornya [11]. Dengan asumsi tiap BTS menggunakan antena sektoral, maka akan ada 3 sektor dalam setiap BTS yang akan dihitung kapasitasnya. Setiap TRx yang digunakan akan mampu menangani 8 kanal, masing-masing kanal ini akan diduduki oleh satu panggilan/pembicaraan pelanggan. Dalam satu tower BTS (Base Transceiver Station) dapat memiliki hingga 16 TRx (Transmitter and Receiver) bergantung pada letak dan kebutuhan akan layanan dari wilayah yang dicakupi oleh BTS tersebut.

Terdapat beberapa komponen yang membutuhkan pasokan energi listrik dalam sebuah BTS. Diantaranya ada komponen yang digunakan per sektor sel seperti DSP (Digital Signal Processing) yang bertanggungjawab untuk menangani jalannya sistem dalam sektor tersebut, dan ada juga yang wajib terpasang pada tiap BTS seperti power amplifier dan transceiver yang bertugas dalam menyalurkan sinyal antar

seluler [13]. Secara umum kebutuhan listrik pada BTS digambarkan dalam Gambar 2.3. Kebutuhan listrik dari tiap komponen ini dikalikan dengan jumlah sektor yang dilingkupi [14].



Gambar 2. 3 Kebutuhan Listrik dalam Base Station

Margot, et.al (2011) mengemukakan sebuah model yang dapat menentukan kebutuhan energi listrik yang dibutuhkan dalam BTS [14]. Total beban listrik yang ada pada sebuah BTS diformulasikan dalam Persamaan (1).

$$P_{BTS} = n_{sector} * (P_{BTS} + P_{DSP} * (P_{Amp} + P_{Trans}) + P_{Rec}) + \sum_i^n P_{AC_i} + \sum_k^l P_{micro} + \sum_j^m P_{LB_j} \quad (1)$$

n_{sector} mewakili jumlah sektor dalam sel, n_{TR} mewakili jumlah antenna *transmitter* per sektor dan P_{BTS} , P_{DSP} , P_{Amp} , P_{Trans} , P_{Rec} , $\sum_i^n P_{AC_i}$, $\sum_k^l P_{micro}$ dan $\sum_j^m P_{LB_j}$ adalah total konsumsi listrik pada BTS, besarnya beban listrik pada DSP, besarnya beban listrik pada *amplifier*, besarnya beban listrik pada *transceiver*, besarnya beban listrik pada *rectifier*, besarnya beban listrik AC (*air conditions*), besarnya beban

lisrik pada *microwave*, dan besarnya beban lisrik pada *incandescent bulbs*. Dimana n , l , dan m merupakan jumlah AC, microwave dan lampu yang digunakan dalam BTS. Sehingga total konsumsi energi (E_{BTS}) yang digunakan dalam BTS didapatkan dari Persamaan (2).

$$E_{BTS} = P_{BTS} * t \quad (2)$$

Dimana t adalah total waktu penggunaan atau durasi dari digunakannya BTS. Dalam pengerjaan tugas akhir ini diasumsikan BTS selalu dalam keadaan aktif atau menyala sehingga waktu (t) memiliki nilai 24 jam.

2.5 Potensi Energi Surya

Energi surya termasuk dalam sumber daya alam yang dapat diperbaharui dan bersifat natural atau berasal dari alam. Sumber energi didapatkan dari pancaran sinar matahari. Di saat hari yang cerah, energi matahari yang menyinari bumi menghasilkan rata-rata 1 kilowatt per meter persegi area bumi, berarti dalam satu jam energi matahari yang menyinari bumi mampu mensuplai energi yang dibutuhkan di seluruh dunia untuk 1 tahun. Permukaan bumi disinari matahari dengan jumlah volume yang sangat besar. Tidak seperti minyak bumi, batu bara dan energi fosil lainnya, energi matahari ramah lingkungan, untuk pemakaiannya tidak menghasilkan emisigas buang CO₂ yang dapat merusak lingkungan, oleh karena itu teknologi panel surya sangat mendukungpenyediaan energi alternatif pada saat krisis energi dan mendukung pencegahan pemanasan global di dunia.

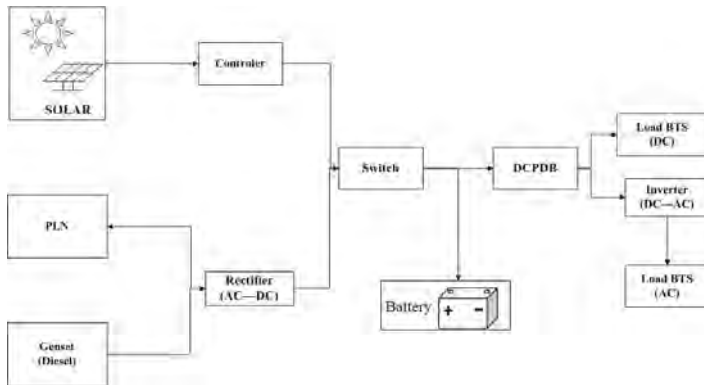
Besarnya pancaran sinar matahari tergantung pada letak wilayah itu sendiri, dilihat dari garis bujur dan lintang. Kondisi geografis Indonesia yang dilalui oleh garis khatulistiwa menjadikan negara Indonesia termasuk dalam

daerah tropis. Radiasi matahari di daerah tropis (didekat ekuator), khususnya daerah Jawa Timur mempunyai tingkat radiasi yang cukup tinggi. Rata-rata solar radiasi horisontal di musim penghujan mencapai sekitar 363 Wh.m², dan 396 Wh.m² di musim kemarau. Dengan pancaran sinar sebesar itu jika menggunakan panel surya dapat menghasilkan total energi sekitar 1500 Kwh/KwP [15]. Oleh karena itu dengan keuntungan letak yang strategis dengan sinar matahari yang memadai, seharusnya mulai lebih memanfaatkan energi Sel Surya (PV) sebagai energi alternatif.

Dalam pemanfaatan potensi energi surya dapat dikategorikan dalam dua macam teknologi, yaitu: (1) Teknologi energi surya fotovoltaik, yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik pada alat listrik; (2) Teknologi energi surya termal, yang memanfaatkan pancaran panas dari matahari umumnya digunakan untuk memasak, memanaskan dan lain sebagainya.

2.6 Perencanaan Sistem Tenaga Hibrida pada BTS

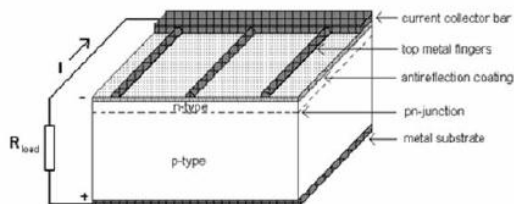
Sistem tenaga hibrida pada umumnya terdiri dari sumber energi utama yang bekerja secara paralel dengan unit energi tambahan lainnya. Pada tugas akhir ini akan dibuat model yng dapat menghasilkan konfigurasi sistem yang paling optimal pada BTS (Base Transceiver Station) di Pulau Bawean Tambak milik perusahaan Telkomsel di Jawa Timur. Dalam Gambar 2.4 di bawah ini sistem penggunaan PV dengan genset pada BTS yang akan digunakan pada tugas akhir ini. Komponen sistem tenaga surya terdiri dari panel surya (Fotovoltaik), baterai, charges controller, switch, inverter dan tenaga listrik yang didapat dari genset.



Gambar 2. 4 Diagram Sistem Tenaga Hibrida pada BTS Pulau Bawean Tambak

2.6.1 Teknologi Tenaga Surya Fotovoltaik

Sel surya atau fotovoltaik adalah perangkat yang mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Efek fotovoltaik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan foto ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit. Pada tahun 1954 peneliti di Bell Telephone menemukan untuk pertama kali sel surya silikon berbasis p-n junction dengan efisiensi 6%.



Gambar 2. 5 Struktur Sel Surya

Adapun struktur pada sel surya yang tergambar pada Gambar 2.5 sebagai berikut:

- Kaca Pelindung dan material adhesive transparan yang melindungi bahan sel surya dari keadaan lingkungan.
- Material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya dan mengurangi jumlah cahaya yang dipantulkan.
- Semikonduktor P-type dan N-type (terbuat dari campuran Silikon) untuk menghasilkan medan listrik.
- PN-junction adalah lapisan penghubung. Saluran awal dan saluran akhir (terbuat dari logam tipis) untuk mengirim elektron pada pengisian baterai atau langsung digunakan untuk kebutuhan listrik. Elektron yang disuplai langsung dari current collector bar yang bermuatan (-) dan metal substrate yang bermuatan (+).

Prinsip kerja sel surya adalah sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor diode. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh lapisan anti refleksi, kemudian terjadi pelepasan elektron. (Elektron-elektron bebas terbentuk dari million photon atau benturan atom pada lapisan penghubung). Sehingga elektron menuju ke semi-konduktor pada lapisan yang berbeda, yaitu pada Semikonduktor tipe-n dan Semikonduktor tipe-p. Ketika dua tipe material tersebut mengalami kontak maka kelebihan elektron dari tipe-n berdifusi pada tipe-p. Sehingga area doping-n akan bermuatan positif sedangkan area doping-p akan bermuatan negatif. Terjadi

perubahan sigma gaya-gaya pada bahan menyebabkan perbedaan potensial dan arus akan mengalir.

Bright (2011) daya (W_{peak}) yang dikeluarkan oleh sistem tenaga surya atau PLTS dapat dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut ini [4].

Besarnya energi yang akan dipasok oleh sistem panel surya (E_{pv}) dapat ditentukan oleh pengguna sistem, dengan mendefinisikannya sebesar berapa persen dari keseluruhan energi total yang dibutuhkan. Persamaan (3) merumuskan besarnya E_{pv} :

$$E_{pv} = \text{Kontribusi}\% \times E_{BTS} \quad (3)$$

Dalam menghitung jumlah panel surya untuk memenuhi kebutuhan energi, maka perlu dicari besarnya PV area dengan Persamaan (4):

$$PV \text{ area} = \frac{E_{pv}}{I_v \times \mu_{pv} \times TCF} \quad (4)$$

Nilai *Isolation Value* (I_v) diartikan sebagai rata-rata kWh per hari energi sinar matahari yang ditangkap pada setiap meter persegi panel surya pada kecepatan lintang. Nilai *Isolation Value* (I_v) ini bervariasi tergantung pada lokasinya. TCF merupakan nilai daya keluar maksimum panel surya pada saat temperatur tinggi dengan memperhatikan besarnya kapasitas panel yang digunakan (P_{out}), dapat dihitung dengan Persamaan (5).

$$TCF = P_{out \ t \rightarrow 28 \ C} / P_{out} \quad (5)$$

Setelah mendapatkan nilai PV area maka selanjutnya dapat dihitung besarnya daya yang dapat dibangkitkan oleh panel surya (P_{wp}) dengan Persamaan (6) berikut ini:

$$P_{wp} = PV \text{ area} \times PSI \times \mu_{pv} \quad (6)$$

Dimana keluar μ_{pv} adalah efisiensi pembangkitan energi listrik yang dihasilkan modul fotovoltaik; PSI merupakan tetapan *Peak Sun Insolation* yaitu sebesar 1 kW/m^2 .

Sehingga jumlah panel surya yang dibutuhkan (N_{pv}) dapat dihitung dengan Persamaan (7) berikut ini:

$$N_{pv} = P_{wp} / P_{out} \quad (7)$$

Pada umumnya modul fotovoltaik dipasarkan dengan kapasitas 100 Watt-peak (Wp) dan kelipatannya. Unit satuan Watt-peak adalah satuan daya (Watt) yang dapat dibangkitkan oleh modul fotovoltaik dalam keadaan standar uji (*Standard Test Conditions-STC*).

2.6.2 Baterai Surya

Baterai dapat digunakan sebagai media penyimpanan energi yang telah diserap oleh panel surya. Sehingga ketika dalam keadaan tidak ada sinar matahari maka sistem tetap dapat teraliri listrik. Dalam sistem *solar power*, digunakan baterai yang memiliki masa pakai (*lifetime*) yang panjang dan mampu menyimpan energi yang besar. Untuk menghitung ukuran baterai yang dibutuhkan (B_{AHR}) dalam memasok cadangan listrik selama n hari (ketika tidak ada sinar matahari), maka dicari dengan perhitungan pada Persamaan (8):

$$B_{AHR} = (Et \times n) / (Vs \times \eta) \quad (8)$$

Dimana n adalah jangka waktu (hari) penyimpanan, Vs adalah tegangan operasi baterai yang bervariasi tergantung dengan kapasitas baterai yang akan digunakan, η adalah nilai efisiensi dari kegagalan sistem.

Pilihan dari baterai menentukan jumlah baterai yang akan digunakan, untuk meminimalkan jumlah baterai dan ruang yang tersedia, disarankan untuk menggunakan baterai kapasitas tinggi. Mempertimbangkan kapasitas baterai yang digunakan, jumlah baterai penyimpanan yang diperlukan dapat dicari melalui Persamaan (9) sebagai berikut:

$$N_{BTR} = B_{AHR} / I_b \quad (9)$$

Dimana N_{BTR} adalah jumlah baterai yang digunakan, I_b adalah nilai arus baterai yang dipilih, B_{AHR} adalah waktu yang diperlukan amp penyimpanan baterai. Baterai dapat dihubungkan bersama-sama baik paralel atau cara serial.

2.6.3 Generator Listrik

Generator listrik merupakan sebuah dinamo besar yang berfungsi sebagai pembangkit listrik. Generator listrik ini mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Generator listrik pertama kali ditemukan oleh Faraday pada tahun 1831. Pada saat itu, generator listrik dibuat dalam bentuk gulungan kawat pada besi yang berbentuk U. Generator listrik tersebut terkenal dengan nama Generator cakram Faraday. Cara kerja generator listrik adalah menggunakan induksi elektromagnet, yaitu

dengan memutar suatu kumparan dalam medan magnet sehingga timbul energi induksi.

Terdapat 2 komponen utama pada generator listrik, yaitu: sator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Rotor akan berhubungan dengan poros generator listrik yang berputar pada pusat stator. Kemudian poros generator listrik tersebut biasanya diputar dengan menggunakan usaha yang berasal dari luar, seperti yang berasal dari turbin air maupun turbin uap.

2.6.4 PLN

Perusahaan Listrik Negara (disingkat PLN) adalah sebuah BUMN yang mengurus semua aspek kelistrikan yang ada di Indonesia. Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PLN telah ditetapkan oleh Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral sesuai Surat Keputusan No. 634 - 12/20/600.3/2011 tanggal 30 September 2011. Surat keputusan tersebut menetapkan Wilayah Usaha PLN yang meliputi seluruh wilayah Republik Indonesia. Untuk provinsi Jawa Timur termasuk dalam wilayah operasi Jawa-Bali, khususnya PLN distribusi Jawa Timur.

Penjualan tenaga listrik di wilayah Jawa-Bali pada lima tahun terakhir tumbuh rata-rata 6,7% per tahun. Angka ini relatif lebih rendah daripada pertumbuhan rata-rata di Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Maluku, Papua dan Nusa Tenggara. Namun di sisi pasokan listrik kebutuhan di Jawa-Bali sangat besar dibandingkan dengan daerah luar Jawa-Bali, kemampuan pasokan sistem Jawa – Bali adalah sebesar 31.815 MW. Nilai ini tiga kali lipatnya

dari wilayah luar Jawa-Bali [16]. Rincian kapasitas pembangkit sistem Jawa-Bali berdasarkan jenis pembangkit dapat dilihat pada Gambar 2.6.

No	Jenis Pembangkit	PLN	IPP	Jumlah	
				MW	%
1	PLTA	2.386	150	2.536	8.0%
2	PLTU	14.080	3.865	17.945	56.4%
3	PLTG	2.086	300	2.386	7.5%
4	PLTGU	7.827	-	7.827	24.6%
5	PLTP	360	685	1.045	3.3%
6	PLTD	76	-	76	0.2%
Jumlah		26.815	5.000	31.815	100.0%

Gambar 2. 6 Kapasitas Terpasang Pembangkit Sistem Jawa-Bali hingga Tahun 2013

Masalah mendesak yang saat ini dihadapi PLN antara lain upaya memenuhi daerah-daerah yang kekurangan pasokan listrik dan mengganti pembangkit berbahan bakar minyak dengan bahan bakar non-minyak serta melistriki daerah yang belum mendapatkan pasokan listrik, termasuk daerah-daerah perbatasan dan terpencil, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Hal ini menjadi keterbatasan dari sistem listrik PLN.

Besarnya penggunaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berbahan bakar batubara, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 menjadikan PLN sebagai penyumbang besar emisi karbondioksida. Emisi meningkat hampir 2 kali lipat dari 127 juta ton pada 2013 menjadi 239 juta ton pada 2022. Grid emission factor akan meningkat dari 0,778 kgCO₂/kWh pada 2013 menjadi 0,847 kgCO₂/kWh pada 2017 karena banyak beroperasi PLTU FTP-1 dan PLTU IPP [16].

2.7 Annual Cost of Energy (*ACoe*)

Biaya yang diperhitungkan dalam tugas akhir ini adalah total biaya keseluruhan untuk pengadaan pasokan energi listrik yang harus dibayarkan oleh perusahaan setiap tahunnya. Dalam studi kasus sistem tenaga hibrida ini, dimana kebutuhan beban listrik akan dipasok oleh tiga buah sumber catu daya. Maka biaya operasional juga terdiri dari biaya operasional sistem PV, biaya pemakaian PLN, dan biaya operasional generator diesel (genset). Untuk menggambarkan total biaya yang dibutuhkan dalam konfigurasi sistem tenaga hibrida digunakan formulasi penghitungan biaya pada Persamaan (10). Biaya yang dihabiskan untuk menghasilkan satu kWh (C) dihitung dengan membagi penjumlahan dari nilai PV (*Present Value*) komponen peralatan, biaya operasi dan pemeliharaan tahunan dan investasi modal yang digunakan.

$$ACoe = \left(\sum_{k=1}^m C_k + OM_k \right) \quad (10)$$

Dimana C adalah biaya energi atau biaya yang dihabiskan untuk menghasilkan satu kWh dari setiap sistem k , OM_k adalah biaya operasional dan pemeliharaan dari sistem k .

2.7.1 Biaya Energi (*COE*) Sistem PV

Biaya energi PV berbeda dengan biaya energi untuk pembangkit konvensional. Hal ini dikarenakan besarnya biaya energi PV untuk membangkitkan 1 kWh dipengaruhi oleh biaya investasi dikeluarkan di awal proyek, biaya pemeliharaan dan biaya penyusutan pertahunnya.

- **Biaya Investasi ($C_{investasi}$)**

Biaya investasi merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan pada saat awal membangun sistem pembangkit listrik tenaga surya. Biaya ini terdiri dari biaya pembelian komponen, biaya pengiriman, biaya instalasi, dan biaya lainnya.

- **Biaya Pemeliharaan dan Operasional ($C_{O\&M}$)**

Berdasarkan penelitian di beberapa negara Eropa dan Mediterania, besarnya biaya pemeliharaan dan operasional ditentukan sebesar 1% [7]. Biaya tersebut sudah mencakup upah untuk pekerjaan pembersihan, biaya pemeliharaan panel surya dan pemeriksaan peralatan. Berdasarkan acuan tersebut maka pada tugas akhir ini ini besar persentase untuk biaya pemeliharaan dan operasional per tahun PV akan ditetapkan sebesar 1% dari total biaya investasi awal. Sehingga Persamaan (11) untuk $C_{O\&M}$ adalah sebagai berikut:

$$C_{O\&M} = 1/100 \times C_{investasi} \quad (11)$$

- **Biaya Siklus Hidup (LCC)**

Biaya siklus hidup atau Life Cycle Cost untuk PV ditentukan oleh nilai sekarang dari biaya total sistem PV yang terdiri dari biaya investasi awal ($C_{investasi}$) dan biaya jangka panjang untuk pemeliharaan dan operasional (MPW). Sehingga biaya siklus hidup (LCC) PV pada tugas akhir ini akan dihitung dengan Persamaan (12).

$$LCC = C_{investasi} + MPW \quad (12)$$

Besar nilai sekarang (*present value*) untuk biaya pemeliharaan dan operasional (MPW) PV selama umur proyek n tahun dengan tingkat diskonto sebesar i dihitung dengan Persamaan (13) sebagai berikut:

$$MPW = C_{O\&M} \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad (13)$$

- **Biaya Energi PV**

Perhitungan biaya energi (*cost of energy*) suatu PV ditentukan oleh biaya siklus hidup (LCC), faktor pemulihan modal (CRF) dan kWh produksi tahunan (E_{pv} tahunan). Biaya energi PV dihitung dengan Persamaan (14) sebagai berikut :

$$COE_{pv} = \frac{(LCC \times CRF)}{E_{pv} \text{ (tahunan)}} \quad (14)$$

Faktor pemulihan modal untuk mengkonversikan semua arus kas biaya siklus hidup menjadi serangkaian biaya tahunan, dihitung dengan Persamaan (15).

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

2.7.2 Biaya Energi (COE) Sistem PLN

Biaya untuk energi dari PLN (COE_{pln}) disebut juga sebagai biaya pemakaian listrik yang harus dibayarkan pelanggan PLN. Biaya ini mengacu pada tarif tenaga listrik yang ditetapkan oleh perusahaan dan disetujui oleh

pemerintah. Untuk bulan Juni 2015 tarif tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.7.

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA KVArh (Rp/kVArh)	
1.	R-1/TR	1.300 VA	*)	1.352,00	1.352,00
2.	R-1/TR	2.200 VA	*)	1.352,00	1.352,00
3.	R-2/TR	3.500 VA s.d. 5.500 VA	*)	1.524,24	1.524,24
4.	R-3/TR	6.600 VA ke atas	*)	1.524,24	1.524,24
5.	B-2/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.524,24	1.524,24
6.	B-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.115,60 Blok LWBP = 1.115,60 = 1.200,65 ****)	-
7.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.115,60 Blok LWBP = 1.115,60 = 1.200,65 ****)	-
8.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas	***)	Blok WBP dan Blok LWBP = 1.070,42 = 1.070,42 ****)	-
9.	P-1/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.524,24	1.524,24
10.	P-2/TM	di atas 200 kVA	**)	Blok WBP = K x 1.115,60 Blok LWBP = 1.115,60 = 1.200,65 ****)	-
11.	P-3/TR		*)	1.524,24	1.524,24
12.	L/TR, TM, TT		-	1.661,01	-

Gambar 2. 7 *Tariff Adjustment* PLN Bulan Juni 2015

2.7.3 Biaya Energi (COE) Sistem Generator Diesel

Biaya untuk membangkitkan energi dari generator diesel bergantung pada beberapa hal, yaitu konsumsi bahan bakar (liter) setiap jamnya ($Cons_{diesel}$), harga pembelian dari bahan bakar (Pr_{fuel}) dan besarnya tenaga yang dikeluarkan oleh generator dalam kW (P_{gen}). Sehingga biaya energi generator diesel (COE_{diesel}) dihitung dengan Persamaan (16) [7].

$$COE_{diesel} = \frac{Cons_{diesel} \times Pr_{fuel}}{P_{gen}} \quad (16)$$

2.8 Algoritma Genetika

Algoritma ini ditemukan di Universitas Michigan, Amerika Serikat oleh John Holland (1975) melalui sebuah penelitian dan dipopulerkan oleh salah satu muridnya, David Goldberg (1989). Dimana mendefenisikan algoritma genetik ini sebagai metode algoritma pencarian berdasarkan pada mekanisme seleksi alam dan genetik alam.

Algoritma genetika adalah algoritma yang berusaha menerapkan pemahaman mengenai evolusi alamiah pada tugas-tugas pemecahan-masalah (problem solving). Pendekatan yang diambil oleh algoritma ini adalah dengan menggabungkan secara acak berbagai pilihan solusi terbaik di dalam suatu kumpulan untuk mendapatkan generasi solusi terbaik berikutnya yaitu pada suatu kondisi yang memaksimalkan kecocokannya atau lazim disebut fitness. Generasi ini akan merepresentasikan perbaikan-perbaikan pada populasi awalnya. Dengan melakukan proses ini secara berulang, algoritma ini diharapkan dapat mensimulasikan proses evolusioner.

Algoritma genetika berangkat dari himpunan solusi yang dihasilkan secara acak yang disebut populasi. Sedangkan setiap individu dalam populasi disebut kromosom yang merupakan representasi dari solusi dan masing-masing dievaluasi tingkat ketangguhannya (fitness) oleh fungsi yang telah ditentukan. Melalui proses seleksi alam atas operator genetik, gen-gen dari dua kromosom (disebut parent) diharapkan akan menghasilkan kromosom baru dengan tingkat fitness yang lebih tinggi sebagai generasi baru atau keturunan (offspring) berikutnya. Kromosom-kromosom tersebut akan mengalami iterasi yang disebut generasi (generation). Pada setiap generasi, kromosom

dievaluasi berdasarkan nilai fungsi fitness (Gen dan Cheng, 2000). Setelah beberapa generasi maka algoritma genetika akan konvergen dapat kromosom terbaik, yang merupakan solusi optimal (Goldberg, 1989).

Terdapat empat kondisi yang berpengaruh pada proses evaluasi individu, yaitu:

- a. Kemampuan individu untuk melakukan reproduksi
- b. Keberadaan populasi individu yang melakukan reproduksi
- c. Keberagaman individu dalam suatu populasi
- d. Perbedaan kemampuan untuk bertahan hidup

Individu yang lebih kuat akan memiliki kemampuan bertahan dan reproduksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan individu yang lebih lemah. Pada kurun waktu tertentu, populasi akan lebih banyak memuat individu yang lebih kuat.

2.8.1 Komponen Algoritma Genetika

Terdapat beberapa komponen yang digunakan pada algoritma genetika beberapa diantaranya juga merupakan istilah biologis. Berikut daftar komponen dari algoritma genetika:

- (a) Gen, merupakan nilai yang menyatakan satuan dasar yang mewakili suatu maksud dalam satu kesatuan gen yang disebut kromosom
- (b) Kromosom, merupakan gabungan dari gen-gen yang membentuk nilai tertentu dan menyatakan kemungkinan solusi dari suatu permasalahan.
- (c) Populasi, merupakan kumpulan dari individu atau kromosom yang merupakan calon solusi.
- (d) *Fitness Score*, merupakan nilai kecocokan yang dimiliki oleh tiap kromosom dan didapat dari

penghitungan variabel kromosom dalam fungsi kecocokan (*fitness function*).

2.8.2 Operator Algoritma Genetika

Dalam algoritma genetika mencakup beberapa proses. Berikut ini adalah daftar istilah proses yang ada di algoritma genetika:

- *Reproduction*, merupakan sebuah proses untuk mendapatkan generasi potensial dengan memilih parent dengan nilai lebih tinggi atau dengan memilih parent yang mempunyai kemungkinan besar untuk dipilih saat proses reproduksi.
- *Crossover*, memilih posisi acak dalam deretan dan bertukar segmen baik ke kanan atau ke kiri dengan segmen lain di dalam deretan untuk menghasilkan dua keturunan baru.
- *Mutation*, merupakan perubahan acak dalam representasi kromosom.
- *Elitism*, merupakan proses mempertahankan keturunan terbaik untuk berkembang melalui generasi.

2.8.3 *Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)*

Algoritma genetika sebagai metode optimasi dengan pendekatan berbasis populasi, sangat cocok untuk memecahkan masalah optimasi multi-obyektif. Kemampuan algoritma genetika untuk secara bersamaan mencari berbagai daerah dari ruang solusi memungkinkan untuk menemukan satu set beragam solusi untuk masalah yang sulit dengan berbagai macam karakteristik. Operator pindah silang pada algoritma genetika dapat memanfaatkan struktur solusi yang baik dengan

menghubungkannya pada tujuan yang berbeda untuk menciptakan solusi *non-dominated* baru.

Pada penyelesaian masalah multi-obyektif, tidak menghasilkan solusi tunggal. Tujuan dari algoritma genetika multi-obyektif adalah untuk menemukan satu set solusi dalam rentang batasan (idealnya dengan penyebaran yang baik). Himpunan solusi yang merupakan kumpulan dari beberapa titik juga dikenal sebagai *Pareto front*. Semua solusi yang ada pada *Pareto front* adalah solusi optimal.

Selain itu, sebagian besar algoritma genetika dengan multi-tujuan tidak memerlukan pengguna untuk memprioritaskan, skala, atau bobot dari tiap tujuan. Oleh karena itu, Algoritma Genetika telah menjadi pendekatan heuristik yang paling populer untuk desain dan optimasi masalah multi-tujuan. Jones et al. [4] melaporkan bahwa 90% dari pendekatan untuk optimasi multi-tujuan bertujuan untuk mendekati set dari *Pareto front* untuk menyelesaikan masalah mendasar. Mayoritas ini menggunakan teknik meta-heuristik, dan 70% dari semua pendekatan metaheuristik didasarkan pada pendekatan evolusioner.

Dalam optimasi dengan satu tujuan (*single*), hanya ada satu tujuan utama proses optimasi, yaitu mencari solusi yang optimal. Namun, dalam optimasi dengan multi-tujuan ada dua tujuan yang sama pentingnya:

- Untuk menemukan satu set solusi sedekat atau semirip mungkin ke set *Pareto optimal*.
- Untuk menemukan satu set solusi yang seberagam mungkin.

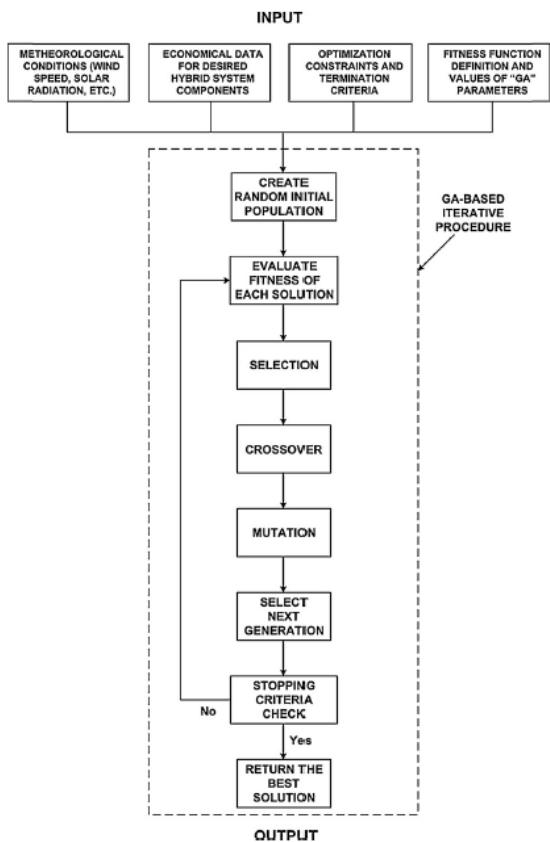
2.8.4 Pendekatan Algoritma Genetika dalam Optimasi Sistem Tenaga Hibrida

Penggunaan algoritma genetika dalam penentuan ukuran komponen dari sistem energi disajikan pada Gambar 2.8. Seperti yang terlihat, data masukan metodologi berbasis algoritma genetika ini diantaranya terdiri dari kondisi meteorologi wilayah, proyeksi harga satuan komponen sistem surya (termasuk biaya instalasi dan pemeliharaan), batasan dari permasalahan dan fungsi kecocokan (*fitness*). Contoh batasan yang dapat dimasukkan ke dalam model adalah jumlah maksimum panel PV pada atap bangunan yang dibatasi oleh wilayah atap, jumlah turbin angin yang terpasang dibatasi oleh luas lahan dan lain sebagainya. Selain itu, parameter bagi operator algoritma genetika seperti persentase seleksi dan tingkat mutasi harus disediakan sebelum proses dimulai.

Dengan generasi populasi acak di awal, algoritma genetika menawarkan solusi acak untuk komponen sistem surya yang memenuhi keseimbangan generasi permintaan beban atau daya pada setiap iterasinya. Setiap solusi acak tersebut akan dievaluasi dengan menghitung nilai kecocokan. Proses *Selection* akan menyeleksi solusi terbaik dilihat dari nilai kecocokan yang telah dihitung. Selanjutnya solusi terpilih akan dilakukan proses *crossover* dimana memungkinkan munculnya solusi baru yang memiliki nilai kecocokan lebih tinggi dari sebelumnya. Sebagai contoh dalam sistem hibrida menggunakan kombinasi komponen panel surya (PV)-turbin angin-diesel, dari proses *selection* didapat dua buah solusi konfigurasi yaitu 10/20/15 (10 kW turbin, 20 kW panel surya, 15 kW diesel) dan 5/25/12 (5 kW turbin, 25 kW panel surya, 12 kW diesel). Sehingga ketika

dilakukan proses *crossover* maka akan menghasilkan 2 buah solusi baru yang mana mungkin saja memiliki nilai kecocokan yang lebih tinggi atau sebaliknya, yaitu: 5/25/15 (5 kW turbin, 25 kW panel surya, 15 kW diesel) dan 10/20/12 (10 kW turbin, 20 kW panel surya, 12 kW diesel). Dalam proses iterasi algoritma genetika dapat dilakukan pula proses *mutation* dimana mengganti salah satu gen pada kromosom . Misalnya dengan mengganti ukuran diesel dari 15 kW menjadi 5 kW pada solusi 10/20/15 (10 kW turbin, 20 kW panel surya, 15 kW diesel). Ketika generasi baru telah terbentuk, maka solusi tersebut akan melalui evaluasi dan terbentuk populasi baru untuk beberapa iterasi hingga didapatkan hasil yang baik. Proses ini sama dengan evolusi biologi dimana yang terbaik yang bertahan.

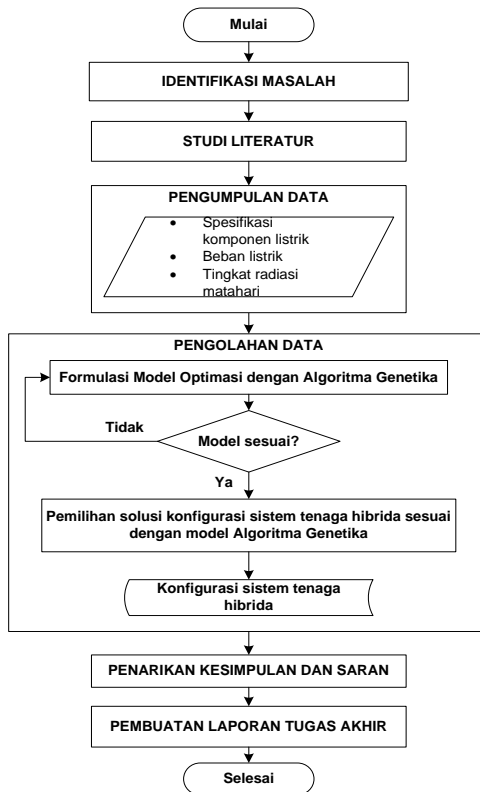
Keuntungan yang paling signifikan dari penggunaan algoritma genetika dalam menentukan ukuran pada sistem hibrida adalah memiliki kemampuan yang cukup efisien untuk menemukan optimum global [14]. Selain itu, algoritma genetika memungkinkan untuk memasukkan parameter dengan jumlah yang tak terbatas pada sebuah kromosom sehingga membuatnya cocok untuk studi kasus penentuan ukuran (*sizing*). Keuntungan ini tidak tersedia dalam beberapa pendekatan lain yang biasa digunakan seperti *Particle Swarn Optimization* (PSO), *Simulated Annealing*, *Ant Colony*, dan lain-lain. Disamping itu, pendekatan GA tidak memerlukan informasi derivatif.



**Gambar 2. 8 Diagram Alur Algoritma Genetika pada Penentuan
Ukuran Sistem Energi Surya**

BAB III METODOLOGI

Permasalahan tugas akhir ini akan diselesaikan dengan metode yang tergambar pada Gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3. 1 Diagram Alur Pengerjaan Tugas Akhir

3.1 Identifikasi Masalah

Pada tahap ini tahap dimana dilakukannya proses pengkajian permasalahan yang diangkat dalam tema tugas akhir tersebut, sehingga dapat diketahui apa saja kebutuhan dan keluaran yang diinginkan. Identifikasi permasalahan dilakukan dengan mendapatkan informasi tentang penelitian terdahulu dan dikaitkan dengan kondisi terkini yang ada pada saat ini. Sehingga pada akhirnya penelitian ini mengambil permasalahan mengenai perancangan sistem tenaga surya pada tower BTS guna pengoptimasian penggunaan daya listrik pada studi kasus PT. Telekomunikasi Seluler wilayah Jawa Timur. Setelah masalah teridentifikasi, maka dilanjutkan dengan perumusan masalah, pendefinisian batasan, tujuan dan manfaat dari penelitian ini. Sehingga terbentuk pedoman mengenai pengerjaan penelitian yang terfokus dan tidak menyimpang..

3.2 Studi Literatur

Pada tahap ini akan dilakukan pendalaman lebih lanjut mengenai landasan teori yang akan digunakan dalam tugas akhir, terkait materi algoritma genetika, jaringan telekomunikasi, sistem tenaga surya dan optimasi. Selain itu juga dilakukan peninjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu sebagai inputan untuk pengembangan dari penelitian terdahulu tersebut. Referensi materi diperoleh dari beberapa sumber yaitu buku, e-book, jurnal penelitian serta artikel ilmiah.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahapan dimana untuk mendapatkan data untuk kita kembangkan dalam tugas akhir tersebut. Data tersebut bisa ditemukan dalam bentuk

wawancara, studi pustaka, kuisioner, dan lain sebagainya. Data yang dikumpulkan lalu diolah dan dianalisa untuk menemukan jawaban atas permasalahan yang muncul pada penelitian yang sedang dilakukan. Data-data yang dibutuhkan sebagai bahan penelitian ini berasal dari data historis yang dimiliki oleh PT. Telekomunikasi Seluler khususnya pada departemen *Core and Power Performance Assurance* wilayah Jawa Timur yaitu:

- Data komponen listrik pada BTS Telkomsel dan mekanisme penggunaan
- Data BTS terkait koordinat lokasi dan luas area site yang dapat dibangun panel surya sebagai inputan untuk proses optimasi
- Data tingkat radiasi matahari di lokasi site dan besarnya beban listrik
- Data biaya komponen sistem tenaga hibrida

3.4 Pengolahan Data dan Analisis

Berdasarkan data yang telah didapatkan, selanjutnya dilakukan proses pengolahan terhadap data yang telah didapatkan. Proses pengolahan data dan analisis yang terdapat pada penelitian ini terdiri dari beberapa aktivitas yang bertahap dan saling bergantung. Berikut ini aktivitas penelitian yang ada didalamnya:

3.5 Formulasi Model dengan Algoritma Genetika

Permasalahan pada studi kasus akan dituliskan dalam model matematis. Sehingga didapatkan rumusan dari fungsi tujuan, variabel, dan batasan, yang digunakan sebagai komponen algoritma genetika. Selanjutnya model tersebut akan diimplementasikan sesuai dengan tahapan proses yang ada pada algoritma genetika menggunakan *software* komputer. Pada pengerjaan penelitian ini

digunakan software Matlab sebagai *tool* pendukung pembangunan model pada program komputer.

3.6 Verifikasi dan Validasi Model

Selanjutnya model yang telah diimplementasikan ke dalam program Matlab akan dilakukan proses verifikasi dan validasi. Kedua proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa model dan program yang dibuat dapat berjalan tanpa muncul *error* dan telah sesuai dengan tujuan yang diharapkan diawal. Untuk proses verifikasi maka akan dilakukan pengecekan pada kode program Matlab yang telah dibuat dan dilakukan proses uji coba (*running*). Sedangkan cara untuk melakukan validasi adalah dengan membandingkan antara hasil yang dikeluarkan oleh model yang telah dibuat dengan hasil yang dikeluarkan oleh perangkat lunak yang sudah ada, misalnya QM dengan cara membuat model sederhana *Linear Programming*. Apabila hasil yang dikeluarkan sama atau mendekati (berada di tingkat error yang diperbolehkan) maka dapat dikatakan model sudah valid.

3.7 Pemilihan Solusi Konfigurasi

Pada tahap ini dilakukan pemilihan komponen yang mendukung sistem tenaga surya sesuai dengan model Algoritma Genetika yang telah dibuat. Selanjutnya akan menghasilkan rancangan sistem tenaga surya yang harus disediakan pihak operator untuk memenuhi kebutuhan trafik pelanggan, contoh: 4 buah panel surya 12Wp dan 5 buah 10 buah baterai 64 Ah. Pemilihan komponen ini didasari dari pemenuhan kebutuhan pasokan listrik namun dengan biaya energi tahunan (*ACoe*) semurah mungkin dan menghasilkan emisi karbondioksida (*CE*) seminimum mungkin. Pihak operator dapat mengurangi penggunaan konsumsi daya listrik yang menggunakan bahan bakar fosil

dan mewujudkan industri yang lebih ramah lingkungan. Setelah mendapatkan konfigurasi sistem yang paling optimal maka selanjutnya juga akan dihitung perbandingan efisiensi sebelum dan jika menerapkan konfigurasi sistem tenaga surya tersebut.

3.8 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini akan dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil pengerjaan tugas akhir. Dari analisis optimasi akan menghasilkan hasil paling optimal mengenai rancangan sistem tenaga surya pada Base Transceiver Station (BTS) di Pulau Bawean Tambak milik PT. Telekomunikasi Seluler. Berdasarkan solusi yang ditarik pada bagian kesimpulan, terdapat kelebihan dan kekurangan yang nantinya akan dilaporkan ke perusahaan sebagai saran atau masukan dari hasil pengerjaan tugas akhir ini.

3.9 Pembuatan Laporan Tugas Akhir

Tahap ini merupakan tahap akhir dari pengerjaan tugas akhir. Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan buku laporan tugas akhir yang berisi penjelasan dokumentasi langkah-langkah pembuatan tugas akhir secara mendetail, hasil pembuatan tugas akhir, dan kesimpulan dari pengerjaan tugas akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV PERANCANGAN

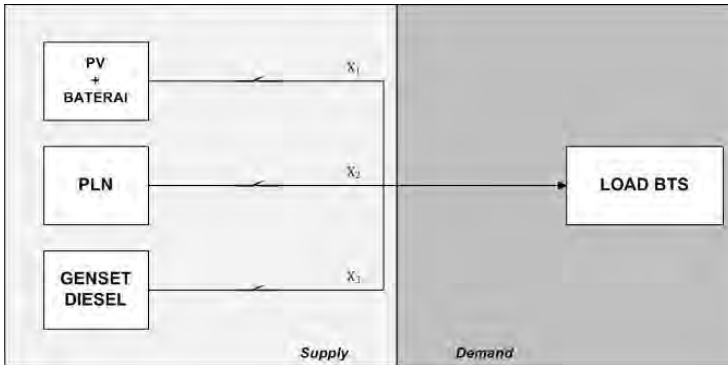
Bab ini menjelaskan mengenai optimasi perancangan konfigurasi sistem tenaga hibrida yang dimodelkan dengan proses Algoritma Genetika. Dimulai dari pengumpulan data hingga mendapatkan hasil solusi konfigurasi yang paling optimal.

4.1 Formulasi Model

Dalam pembuatan formulasi model optimasi terdapat beberapa langkah yang perlu dilakukan yaitu penentuan variabel keputusan, fungsi tujuan dari masalah dan batasan.

4.1.1 Penentuan Variabel Keputusan

Seperti yang telah digambarkan pada Gambar 4.1 sebelumnya, *site* BTS di Pulau Bawean Tambak memiliki tiga buah sumber catu daya listrik sehingga disebut sistem tenaga hibrida. Terdiri dari rangkaian panel surya (PV) beserta baterai, aliran listrik dari PLN dan generator diesel sebagai sumber tenaga cadangan. Ketiga sumber catu daya ini akan bekerja secara bergantian guna memenuhi kebutuhan pasokan listrik pada *site* BTS tersebut.



Gambar 4. 1 Diagram Sumber Catu Daya Listrik BTS Pulau Bawean Tambak

Permasalahan yang akan diselesaikan melalui model optimasi adalah mengetahui jumlah beban daya yang akan dipenuhi oleh masing-masing sumber catu daya. Pasokan listrik harus memenuhi kebutuhan (*demand*) listrik BTS selama 24 jam sehari, artinya harus ada listrik yang selalu mengalir setiap saat.

Selain itu untuk menghitung biaya yang dihabiskan dalam pengadaan PV serta baterai, dibutuhkan inputan ukuran kapasitas panel PV dan baterai yang akan digunakan dalam membuat sistem tenaga hibrida. Setiap ukuran kapasitas memiliki harga dan spesifikasi efisiensi yang berbeda-beda. Untuk itu pemilihan tipe panel PV dan baterai akan ditambahkan menjadi salah satu variabel keputusan dalam model ini. Sehingga variabel keputusan model optimasi pada Tugas Akhir ini dijelaskan pada Tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4. 1 Variabel Keputusan

Variabel	Deskripsi
X1	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh PV+Baterai
X2	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh PLN
X3	Proporsi beban listrik yang dipenuhi oleh Generator Diesel
Y1	Tipe panel PV
Y2	Tipe baterai surya

4.1.2 Perumusan Fungsi Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam permasalahan optimasi ini adalah mengetahui konfigurasi sistem tenaga hibrida dengan biaya operasional yang semurah mungkin serta sistem yang menghasilkan emisi karbondioksida yang paling minimal. Sehingga *fitness function* yang digunakan dalam model optimasi algoritma genetika multiobyektif pada tugas akhir ini adalah persamaan biaya keseluruhan sistem tenaga hibrida dan persamaan emisi karbondioksida. Berikut ini adalah persamaan-persamaan yang diperhitungkan.

- Biaya PV (C_{pv})

$$C_{pvbat} = COE_{pv} \times x_1 \times E_{BTS} \quad (17)$$

Dimana COE_{pv} adalah konversi biaya penggunaan energi PV & baterai per satuan kWh dan C_{acq} adalah biaya awal pembelian dan pemasangan PV & baterai.

- Biaya PLN (C_{pln})

$$C_{pln} = COE_{pln} \times x_2 \times E_{BTS} + C_{abonemen} \quad (18)$$

Dimana COE_{pln} adalah biaya pemakaian listrik per kWh yang harus dibayarkan pada PLN dan $C_{abonemen}$ adalah biaya abonemen pemasangan aliran listrik PLN.

- Biaya Generator Diesel (C_{diesel})

$$C_{diesel} = COE_{diesel} \times x_3 \times E_{tot} + C_{main} \quad (19)$$

Dimana COE_{diesel} adalah biaya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan generator listrik per kWh dan C_{main} adalah biaya perawatan dan rutin bulanan.

- Emisi CO₂ PV&Baterai (E_{pvbat})

$$CE_{pvbat} = k_{pvbat} \times x_1 \times E_{BTS} \quad (20)$$

Dimana k_{pvbat} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO₂-eq/kWh) oleh pembangkit listrik tenaga surya (PV)

- Emisi CO₂ PLN (E_{pln})

$$CE_{pln} = k_{pln} \times x_2 \times E_{BTS} \quad (21)$$

Dimana k_{pln} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO₂-eq/kWh) oleh pembangkit listrik PLN

- Emisi CO₂ Generator Diesel (E_{diesel})

$$CE_{diesel} = k_{diesel} \times x_3 \times E_{BTS} \quad (22)$$

Dimana k_{diesel} adalah konstanta emisi yang dihasilkan per kWh (kg CO₂-eq/kWh) oleh generator listrik

Sehingga fungsi tujuan dalam permasalahan optimasi perancangan sistem tenaga hibrida ini adalah sebagai berikut

$$\text{Fitness(1) Min } C_{total} = C_{pvbat} + C_{diesel} + C_{pln} \quad (23)$$

$$\text{Fitness(2) Min } CE_{total} = CE_{pvbat} + CE_{diesel} + CE_{pln} \quad (24)$$

4.1.3 Perumusan Batasan Model

Dalam menyelesaikan optimasi ini agar memperoleh solusi permasalahan yang sesuai dengan tujuan, maka perlu ditetapkan beberapa batasan. Batasan-batasan yang digunakan dalam permasalahan ini adalah kapasitas beban listrik BTS (arus DC) dan kapasitas beban listrik yang dapat dipasok oleh PLN. Sehingga berikut ini adalah batasan (*constraint*) yang dipertimbangkan dari model optimasi sistem tenaga hibrida ini.

1. Batasan Beban Listrik BTS

Batasan pertama adalah terkait dengan jumlah beban listrik BTS yang harus dipenuhi oleh sistem tenaga hibrida. Besarnya pasokan listrik tidak diperbolehkan berada dibawah kebutuhan beban karena nilai kehandalan dari sistem ini adalah 100% artinya listrik harus tersedia dan menyala selama 24 jam.

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

2. Batasan Kapasitas Beban Listrik PLN

Batasan kedua adalah batasan beban yang dapat dipasok oleh PLN, karena pasokan listrik PLN pada daerah Pulau Bawean Tambak ini belum tersedia selama 24 jam atau listrik masih sering terhambat, sehingga diberikan pada model ini diasumsikan listrik hanya bisa digunakan sekitar 10 jam sehari.

$$x_2 \leq E_{plnmax}$$

3. Batasan Nilai Proporsi Pemenuhan Beban

Batasan nilai proporsi ini bertujuan untuk membatasi nilai minimal proporsi beban yang akan dipenuhi oleh masing-masing sistem sumber tenaga.

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

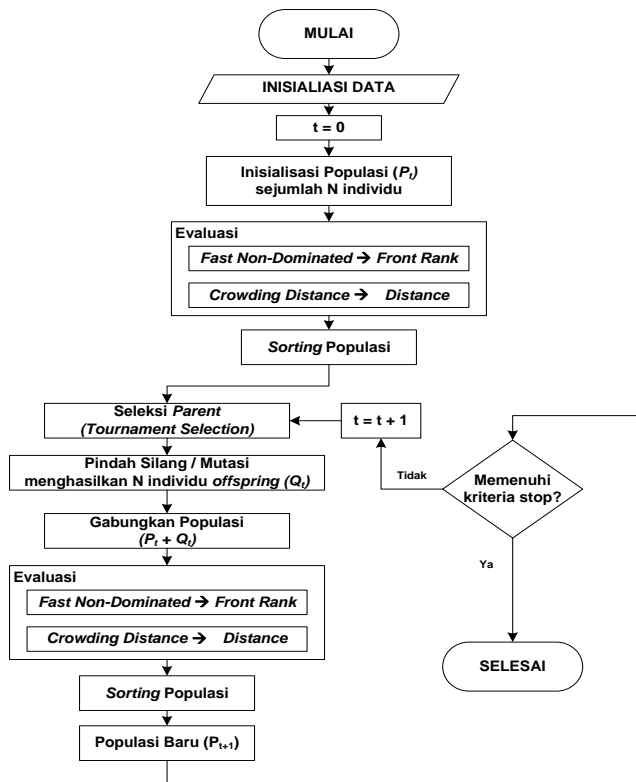
4. Batasan Jumlah Tipe Panel Surya dan Baterai

Batasan ini terkait nilai batas atas dan batas bawah untuk variabel keputusan y yang didapat dari jumlah tipe panel surya dan baterai yang digunakan dalam model ini.

$$1 \leq y_1, y_2 \leq 5$$

4.2 Desain Model Algoritma Genetika

Tugas akhir ini menggunakan metode optimasi berbasis Algoritma Genetika Multi-Obyektif dimana menggunakan *NSGA-II* (*Non Dominated Sorting GA*) sebagai algoritma utama penyelesaian masalah. Adapun urutan kerja dari *NSGA-II* ini dapat kita lihat berdasarkan *flow chart* pada Gambar 4.2 [17].



Gambar 4. 2 Diagram Alur NSGA-II

4.2.1 Inisialisasi Data

Terdapat beberapa data yang akan dimasukkan ke dalam program aplikasi Matlab yang akan dibuat. Berikut adalah data yang perlu diinisialisasikan dalam program.

a. Parameter Sistem Panel Surya (PV) & Baterai

- *Load Profile* (E_{BTS})

Kebutuhan beban listrik yang dibutuhkan oleh BTS di Pulau Bawean Tambak adalah 1800 watt (konstan). Sehingga total *load* dalam satu tahun adalah 15678 kWh (43,2 kWh/hari).

- *Isolation Value* (I_v)

Nilai rata-rata insolasi harian matahari pada BTS di Pulau Bawean Tambak dipergunakan nilai bulanan pada tahun 2011 yang diambil dari website NASA [17] (data dapat dilihat pada Tabel 4.2). Dalam penyelesaian masalah perancangan sistem tenaga hibrida ini digunakan dua jenis skenario kondisi paparan sinar matahari, yaitu (1) kondisi normal (*best scenario*) dan (2) kondisi minimal (*worst scenario*). Sehingga data tingkat insolasi matahari yang digunakan dalam tugas akhir ini juga terdapat dua macam. Untuk skenario kondisi sinar matahari normal digunakan data *Isolation Value* bulanan pada kondisi rata-rata. Sedangkan untuk skenario minimal atau sinar matahari yang kurang digunakan data *Isolation Value* bulanan pada kondisi minimum.

Tabel 4. 2 Rata-rata Insolasi Harian Matahari

Bulan	I _v (kWh/m ² /hari)	
	Avg	Min
Januari	4,49	3,82
Februari	4,53	3,85
Maret	4,71	4,24
April	4,74	4,03
Mei	4,79	4,12
Juni	4,59	4,04
Juli	4,78	4,06
Agustus	5,23	4,70
September	5,74	5,17
Oktober	5,69	4,84
November	5,08	4,23
Desember	4,70	3,80
Rata-Rata	4,92	4,24

- *Peak Sun Insolation (PSI)*

Di permukaan bumi intensitas matahari pada saat di puncak adalah sekitar 1 kW / m² atau 1000 W/m² pada permukaan horizontal di permukaan laut di hari yang cerah [18]

- *Days of Autonomy (Nday)*

Merupakan jumlah hari dimana baterai harus memasok listrik sendiri ketika terbatasnya atau tidak ada pengisian (*charging*). Pada sistem tenaga hibrida BTS di Pulau Bawean Tambak, ditetapkan bahwa nilai Nday adalah 3 hari.

- *Depth of Discharge (DOD_{max})*

DOD menggambarkan seberapa dalam baterai habis. Jika kita mengatakan baterai terisi penuh 100%, itu berarti DOD baterai ini adalah 0%. Untuk ambang batas DOD pada baterai didalam sistem ini adalah 80%.

- Tegangan Sistem (V)

Tegangan di keseluruhan sistem tenaga listrik pada BTS Pulau Bawean Tambak adalah 48 volt.

- Tipe Panel PV (*Solar Cell*)

Panel surya yang digunakan menjadi inputan data pada model tugas akhir ini terdiri dari 5 tipe panel dengan ukuran kapasitas daya yang dibangkitkan (Wp) dan efisiensi modul yang berbeda-beda. Kelima panel ini memiliki brand yang sama, yaitu Yingli Seri Panda 48 cell 40 mm (YLxxx-C-24b) dengan tegangan 24 volt. Tabel 4.3 berisikan informasi dari tipe panel PV yang digunakan dalam model optimasi ini dengan asumsi harga \$3,3/Wp.

Tabel 4. 3 Tipe Kapasitas Panel Surya (PV)

Tipe Panel	Ukuran (Wp)	Harga (Rp)	Efisiensi Modul (%)
1	205	8.118.000	15,6
2	210	8.316.000	15,9
3	215	8.514.000	16,3
4	220	8.712.000	16,7
5	225	8.910.000	17,1

- Baterai Surya

Seperti panel surya sebelumnya, tipe baterai yang digunakan menjadi inputan data pada model tugas akhir ini terdiri dari 5 tipe yaitu dengan ukuran kapasitas daya yang dikeluarkan (Ah) berbeda-beda. Tabel 4.4 berisikan informasi dari tipe baterai dengan merek BAE-Secura 12V (6 x 2V) [19] yang digunakan dalam model optimasi ini. Baterai jenis *deep cycle* atau

husus *solar cell* menjadi pilihan yang cocok untuk digunakan pada sistem tenaga hibrida ini.

Tabel 4. 4 Tipe Kapasitas Baterai Surya

Tipe Baterai	Ukuran (Ah)	Harga (Rp)
1	686	Rp44.023.000
2	788	Rp50.074.500
3	968	Rp56.658.000
4	1140	Rp69.492.500
5	1280	Rp77.805.000

b. Parameter Ekonomi

Dalam perhitungan fungsi tujuan khususnya terkait biaya, terdapat beberapa asumsi parameter atau nilai yang digunakan dalam analisa ekonomi dalam tugas akhir ini. Seperti disebutkan pada Tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4. 5 Parameter Ekonomi

Parameter	Deskripsi	Satuan	Nilai
d	Tingkat diskonto	%	11,5
n	<i>Lifetime</i> proyek	tahun	25
C_{instalasi}	Biaya instalasi sistem PV & Baterai dan komponen pendukung	Rp	225.000.000
C_{ppjpln}	Biaya PPJ PLN	Rp	135.000
C_{kwpln}	Biaya per kWh PLN	Rp	1.524
C_{maintdiesel}	Biaya operasi & perawatan tiap bulan (selain bahan bakar)	Rp	1.500.000
K_{diesel}	Rata-rata pemakaian bahan bakar tiap jam	lt	6,5
P_{rfuel}	Biaya pembelian bahan bakar	Rp	14.000
P_{diesel}	Kapasitas Diesel	kW	16

Tingkat diskonto ini mengacu pada nilai suku bunga kredit bank untuk kredit korporasi pada akhir Mei 2015, data ini diambil dari Bank Indonesia [20]. Data terkait biaya PLN diambil dari penetapan tarif dasar listrik bulan Juni 2015, untuk BTS di Pulau Bawean Tambak tarif listrik yang digunakan termasuk pada Gol. B-2 (600 vA - 200 kVA). Data biaya lainnya didapatkan dari hasil wawancara dan dengan pendekatan asumsi. Data genset yang digunakan adalah data spesifikasi generator diesel Kubota 20kVa.

c. Parameter Emisi Lingkungan

Pada tugas akhir ini salah satu fungsi tujuan adalah meminimalkan emisi karbon yang dihasilkan. Pada tabel 4.6 menampilkan data konstanta emisi yang digunakan pada tugas akhir ini.

Tabel 4. 6 Parameter Emisi Lingkungan

Parameter	Satuan	Nilai
k_{diesel} [21]	kg CO ₂ -eq/kWh	0,88
k_{pln} [22]	kg CO ₂ -eq/kWh	0,778
k_{pvbat} [16]	kg CO ₂ -eq/kWh	0,045

4.2.2 Representasi Kromosom

Dalam menyelesaikan optimasi perancangan konfigurasi sistem tenaga surya menggunakan algoritma genetika ini, langkah pertama yang dilakukan setelah menentukan model optimasi adalah membuat representasi model ke dalam sebuah kromosom. Kromosom merupakan elemen dasar dan utama dari proses pemodelan Algoritma Genetika. Dalam permasalahan ini kromosom terdiri dari gen-gen yang

merupakan variabel keputusan dari model optimasi. Gen yang memakai *double vector*. Pada Gambar 4.3 merupakan contoh dari representasi kromosom yang digunakan pada tugas akhir ini.

0,85	0,1	0,05	2	3
X1	X2	X3	Y1	Y2

Gambar 4. 3 Representasi Kromosom

4.2.3 Inisialisasi Populasi

Proses inisialisasi adalah proses pembentukan populasi awal yang diperoleh dengan cara rekombinasi kromosom sebanyak ukuran populasi yang telah ditentukan diawal. Dalam inisialisasi populasi ini, masing-masing kromosom yang terbentuk harus memenuhi batasan yang telah ditetapkan sebelumnya.

4.2.4 Evaluasi Individu

Setelah didapatkan populasi awal dari hasil random, maka proses selanjutnya adalah mengevaluasi setiap kromosom. Fungsi evaluasi (*fitness function*) yang digunakan adalah dua fungsi minimal pada model optimasi, yaitu pada Persamaan (24) dan (25). Pada metode NSGA-II ini evaluasi dilakukan dengan mencari dua nilai, yaitu (1) Nilai ranking (*front level*) dengan cara *Fast Non-Dominated* dan (2) Jarak antar individu dengan menghitung *Crowding Distance*.

- ***Fast Non-Dominated Sorting***

Proses ini dilakukan untuk mengelompokkan solusi yang ada ke dalam suatu set yang dinamakan *front* berdasarkan sifat dominasinya. *Front* pertama terbentuk didasarkan pada

kumpulan *non-dominant* pada populasi awal dan *front* kedua akan diisi oleh individu yang didominasi oleh individu-individu yang berada pada *front* pertama dan seterusnya. Setiap individu memiliki nilai ranking (*fitness*) berdasarkan tingkatan *front* dari individu tersebut. Untuk permasalahan minimasi-minimasi, ranking terendah adalah ranking yang lebih baik.

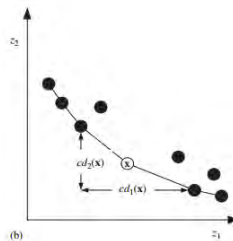
Untuk setiap individu p dalam populasi utama P , dilakukan tahapan yang digambarkan pada Gambar 4.4 [24].

For each $p \in P$	
For each $q \in P$	
If $(p \prec q)$ then	jika p mendominasi q maka
$S_p = S_p \cup \{q\}$	masukkan q di dalam S_p
else if $(q \prec p)$ then	jika p didominasi oleh q maka
$n_p = n_p + 1$	tambahkan n_p
if $n_p = 0$ then	jika tidak ada solusi yang mendominasi p maka
$F_1 = F_1 \cup \{p\}$	p merupakan anggota pada <i>front</i> pertama
$i = 1$	
While $F_i \neq \emptyset$	
$H = \emptyset$	
For each $p \in F_i$	
For each $q \in S_p$	Untuk setiap anggota p di dalam F_i
$n_q = n_q - 1$	Ubah setiap anggota dari kumpulan S_p
if $n_q = 0$ then	lakukan pengurangan n_q
$H = H \cup \{q\}$	Jika $n_q = 0$, q merupakan anggota dari H
$i = i + 1$	
$F_i = H$	front sekarang dibentuk dari semua anggota dari H

Gambar 4. 4 Tahapan *Fast Non-Dominated Sorting*

- **Crowding Distance**

Merupakan nilai yang dimiliki masing-masing individu untuk mengetahui nilai kedekatan antar individu. Didapatkan dengan mencari rata-rata jarak (*distance*) dari kedua titik yang berada disebelahnya. Individu yang diperhitungkan adalah individu yang berada pada tingkat *front* (*Rank*) yang sama.



Gambar 4. 5 Crowding Distance

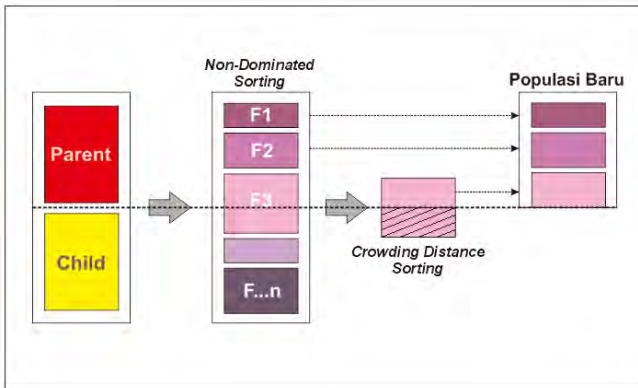
Algoritma untuk menghitung nilai *Crowding Distance* ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah ini [24].

Perhitungan <i>Crowding-distance</i> (I)	
$\ell = I $	Jumlah solusi di dalam I
Untuk setiap i , $I[i]_{\text{distance}} = 0$	inisialisasi jarak
Untuk setiap fungsi tujuan m	
$I = \text{sort}(I, m)$	diurutkan menggunakan nilai pada setiap fungsi tujuan
$I[1]_{\text{distance}} = I[\ell]_{\text{distance}} = \infty$	sehingga setiap batasan selalu dipilih
for $i = 2$ to $(\ell - 1)$	untuk semua nilai poin
$I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + (I[i+1].m - I[i-1].m)$	

Gambar 4. 6 Tahapan Menghitung Nilai Crowding Distance

4.2.5 Rekombinasi dan *Sorting*

Untuk populasi awal yang telah dilakukan operasi pindah silang dan mutasi sehingga menghasilkan populasi anak (*offspring*). Populasi dikombinasikan menjadi satu populasi besar dan dilakukan seleksi untuk membentuk individu-individu pada generasi berikutnya. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.7, populasi diurutkan berdasarkan ranking *non-domination*, generasi yang baru tersebut diisi oleh individu berdasarkan ranking yang dimilikinya hingga ukuran populasi melebihi ukuran populasi awal. Karena melebihi dari ukuran populasi yang telah ditentukan maka dilakukan pemilihan berdasarkan nilai *crowding distance* hingga ukuran populasi normal (N). Proses ini berulang hingga kriteria stop terpenuhi.



Gambar 4. 7 Proses *Sorting* NSGA-II

4.2.6 Seleksi Orang Tua (*Parent*)

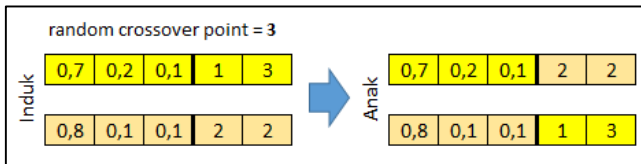
Proses seleksi dilakukan dengan *tournament selection*. Dimana pada metode ini menjalankan beberapa "kompetisi" di antara beberapa individu yang dipilih

secara acak dari populasi. Pemenang setiap kompetisi (satu dengan nilai fitness terbaik) dipilih sebagai *parent* untuk proses pindah silang ataupun mutasi. Tingkat seleksi mudah disesuaikan dengan mengubah ukuran kompetisi. Jika ukuran kompetisi lebih besar, individu yang lemah memiliki kesempatan yang lebih kecil untuk dipilih.

4.2.7 Operasi Pindah Silang

Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan kromosom baru hasil *offspring*. Proses ini melibatkan dua kromosom yang dijadikan sebagai *parent* yang memiliki tugas memproduksi kromosom baru dengan harapan menghasilkan keturunan atau kromosom yang lebih baik. Dalam proses pindah silang ini ada parameter penting yang harus diperhatikan karena berkaitan dengan rasio anak yang akan dihasilkan dalam satu generasi. Parameter itu adalah probabilitas pindah silang. Probabilitas pindah silang menunjukkan presentase jumlah *Old Parent* yang akan dipindahsilangkan dan menghasilkan *offspring* (keturunan baru). Nilai probabilitas ini adalah antara 0 hingga 1, dan cenderung mendekati angka 1. Untuk tugas akhir ini nilai probabilitas pindah silang yang digunakan adalah 0,1-0,9 pada proses uji coba.

Metode pindah silang yang digunakan pada model optimasi Tugas Akhir ini adalah *Single Point Crossover*. Pada metode ini, posisi pindah silang k ($k=1,2,...,n$) dipilih secara acak, dengan n adalah jumlah variabel atau gen dalam satu kromosom. Proses pindah silang *Single Point* diilustrasikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Contoh Proses Pindah Silang

4.2.8 Operasi Mutasi

Proses mutasi dilakukan dengan menukar ukuran salah satu gen dalam kromosom sehingga didapatkan posisi yang berbeda, lagi nilai gen yang telah diperoleh. Pada proses mutasi ini sama dengan pada proses pindah silang, dimana mutasi yang terjadi tergantung pada nilai probabilitas mutasinya. Probabilitas mutasi menunjukkan presentase jumlah offspring yang terkena mutasi. Nilai probabilitas ini adalah antara 0 hingga 1, dan cenderung mendekati angka 0. Untuk tugas akhir ini metode mutasi yang digunakan adalah *Adaptive feasible*. Metode ini secara acak melakukan mutasi yang adaptif bergantung pada kondisi sukses atau tidaknya generasi sebelumnya dan memperhatikan pemenuhan batasan yang ada.

BAB V IMPLEMENTASI

Pada bab ini membahas tahapan penyelesaian masalah dengan mengimplementasikan model ke dalam program Matlab. Pembahasan meliputi proses implementasi model, uji coba program, serta verifikasi dan validasi program yang dibuat.

5.1 Implementasi Model Algoritma Genetika Multi-Obyektif pada Program Matlab

Berdasarkan algoritma yang telah disusun maka model dapat diimplementasikan ke dalam Matlab dengan menggunakan *Optimization Toolbox*. Fungsi optimasi yang digunakan adalah *gamultiobj*. Fungsi ini bisa digunakan dengan dua cara, yaitu melalui jendela *Toolbox* atau dengan membuat file utama dimana berisikan kode program untuk memanggil fungsi optimasi ini.

5.1.1 EvaluasiIndividu.m

File *EvaluasiIndividu.m* merupakan file yang berisi fungsi tujuan dari model Algoritma Genetika Multi-Obyektif. File *EvaluasiIndividu.m* ini nantinya akan dipanggil dalam fungsi optimasi dalam file *main.m* atau pada jendela *Optimization Toolbox*. Potongan program dari input data awal ditunjukkan oleh Segmen Program 5.1 dan Segmen Program 5.2. Penjelasan data yang dimasukkan terdapat pada subbab 4.2.1. Pada segmen program 5.1 ini berisikan data inputan awal yang dibutuhkan dalam penghitungan fungsi tujuan.

```

1. %Beban listrik BTS (kW)
2. Etot = 43.2;
3. %DATA BIAYA PVBAT
4. d = 0.115; %tingkat diskonto
5. n = 25; %lifetime proyek/pv (tahun)
6. PSI = 1000; %Peak sun Insolation (W/m2)
7. Nday = 3; %hari tanpa matahari (otonomy days)
8. DOD = 0.8; %depth of discharge
9. V = 48; %tegangan sistem (volt)
10. Biayainstalasi = 225000000; %Biaya instalasi
    PVBAT
11. %DATA BIAYA PLN
12. Biayalain = 135000; %Biaya PPJ + materiail
    untuk PLN
13. BiayaperkwhPLN = 1524; %Biayaperkwh PLN
    berdasarkan TDL
14. %DATA BIAYA GENSET
15. Bom = 1500000; %biaya perawatan genset (Rp)
16. KonsumDiesel = 6.5; %Pemakaian bahan bakar
    perjam (lt)
17. HargaDiesel = 15000; %Harga bahan bakar (Rp)
18. CapDiesel = 16; %Kapasitas daya genset (kW)
19. %% EMISI CO2
20. EFpvbat = 0.045; %emission factor PV
21. EFpln = 0.778; %emission factor PLN Jawa-Bali
22. EFdiesel = 0.88; %emission factor generator
    diesel

```

Segmen Program 5. 1 Input Data Awal (1)

Untuk Segmen Program 5.2 berisikan data kapasitas, harga dan efisiensi dari komponen panel surya (PV) serta baterai. Digunakan operasi *switch case* untuk memudahkan pengambilan data antara tipe, kapasitas, harga dan efisiensi.

```

23. %% HARGA PV berdasarkan Kapasitas (Wp)
24. tipepv = round(x(4));
25. switch tipepv
26.     case 1
27.         hargapv = 8118000; PMPP = 205; EfPv =
            0.156;
28.     case 2
29.         hargapv = 8316000; PMPP = 210; EfPv =
            0.159;
30.     case 3
31.         hargapv = 8514000; PMPP = 215; EfPv =
            0.163;
32.     case 4
33.         hargapv = 8712000; PMPP = 220; EfPv =
            0.167;
34.     otherwise
35.         hargapv = 8910000; PMPP = 225; EfPv =
            0.171;
36. end
37. %% Kapasitas BATERAI berdasarkan Kapasitas
    (Ah)
38. tipebat = round(x(5));
39. switch tipebat
40.     case 1
41.         hargabat = 44023000; CBat = 686;
42.     case 2
43.         hargabat = 50074500; CBat = 788;
44.     case 3
45.         hargabat = 56658000; CBat = 968;
46.     case 4
47.         hargabat = 69492500; CBat = 1140;
48.     otherwise
49.         hargabat = 77805000; CBat = 1280;
50. end

```

Segmen Program 5. 2 Input Data Awal (2)

```

51. %% Rincian Biaya PVBAT
52. Nbulan = 12;
53. Cpvbat = 0;
54. for b=1:Nbulan
55.     %nilai radiasi tiap bulan
56.     bulan = b;
57.     switch bulan
58.         case 1
59.             Iv = 4.49;
60.         case 2
61.             Iv = 4.53;
62.         case 3
63.             Iv = 4.71;
64.         case 4
65.             Iv = 4.74;
66.         case 5
67.             Iv = 4.79;
68.         case 6
69.             Iv = 4.59;
70.         case 7
71.             Iv = 4.78;
72.         case 8
73.             Iv = 5.23;
74.         case 9
75.             Iv = 5.74;
76.         case 10
77.             Iv = 5.69;
78.         case 11
79.             Iv = 5.08;
80.         otherwise
81.             Iv = 4.7;
82.     end

```

Segmen Program 5. 3 Rincian Biaya Sistem Tenaga Hibrida (1)

Pada Segmen Program 5.3 dan 5.4 berisikan kode program berupa persamaan untuk menghitung biaya serta nilai emisi karbondioksida dari masing-masing sistem. Khusus untuk penghitungan biaya sistem tenaga surya (PVBAT) digunakan operasi *for* untuk melakukan simulasi bulanan, iterasi selama 12 bulan dengan nilai radiasi (Iv) yang berubah tiap bulannya

(baris 54-98). Untuk menjalankan proses optimasi yang menggunakan dua skenario paparan matahari, maka nilai untuk Iv akan diganti pada tiap skenario (baris 59 – 61).

```

83. %Daya yang ditanggung PVBAT
84. Epvbat = x(1)*Etot;
85. %Perhitungan jumlah panel PV
86. nPv = round(((Epvbat/(Iv*EfisiensiPv*((PMPP-
      3)/PMPP))*PSI*EfisiensiPv)/PMPP);
87. %Perhitungan jumlah baterai
88. nBat = round(((Nday*Epvbat/DOD)*1000/V)/CBat);
89. %Biaya Investasi PVBAT
90. Cinvestasi = (nPv * hargapv) + (nBat * hargabat) +
      Biayainstalasi;
91. %Biaya per kWh PVBAT
92. CRF = 0.13;
93. LCC = Cinvestasi + ((0.01*Cinvestasi)*(1/CRF));
94. Epvbatthn = Epvbat*365;
95. BiayaperkwhPVBAT = ((LCC*CRF)/(Epvbatthn));
96. %Biaya PVBAT
97. Cpvat = Cpvat + (Epvbat*BiayaperkwhPVBAT*30);
98. end
99. %% Rincian Biaya PLN
100. %Daya yang ditanggung aliran PLN
101. Epln = x(2)*Etot;
102. %Biaya PLN
103. Cpln = ((Epln)*BiayaperkwhPLN*30) + Biyalain)*12;
104. %% Rincian Biaya Generator Diesel
105. %Daya yang ditanggung Genset
106. Ediesel = x(3)*Etot;
107. %Biaya per kWh Genset
108. BiayaperkwhDiesel =
      (KonsumDiesel*HargaDiesel)/CapDiesel;
109. %Biaya Genset
110. Cdiesel = ((Ediesel*BiayaperkwhDiesel*30) +
      Bcm)*12;

```

Segmen Program 5. 4 Rincian Biaya Sistem Tenaga Hibrida (2)

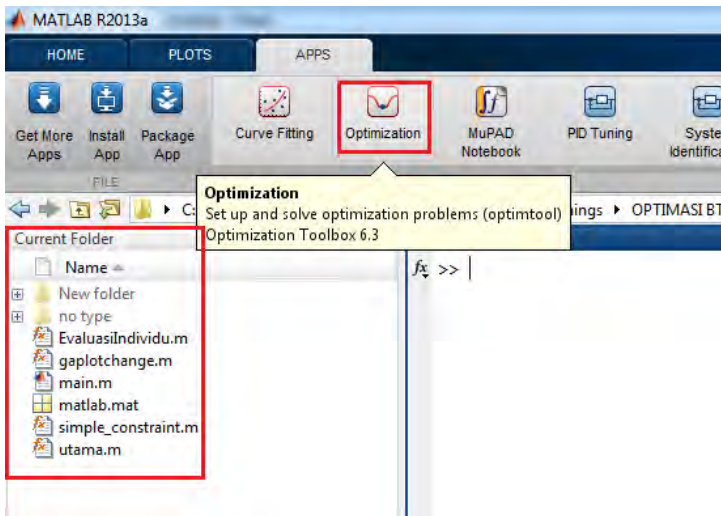
Fungsi tujuan model Algoritma Genetika Multi-Obyektif yang terdiri dari dua fungsi, dituliskan pada deret akhir file *EvaluasiIndividu.m*. Berikut ini merupakan segmen program 5.4 yang merupakan penulisan kode program untuk fungsi tujuan.

```
111.    %% Fitness function
112.    fitness(1) = (Cpvmat+Cpln+Cdiesel);
113.    fitness(2) = (Epvmat+Epln+Ediesel);
```

Segmen Program 5. 5 Fungsi Tujuan

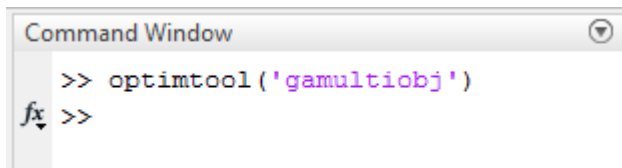
5.1.2 *Running* Algoritma Menggunakan Jendela Optimasi

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *gamultiobj* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini merupakan salah satu fungsi optimasi yang telah terpasang pada *Toolbox Optimization* Matlab. Toolbox ini dapat diakses melalui Tab Apps → Optimizations seperti pada gambar 5.1. Sebelum menjalankan fungsi optimasi, pastikan bahwa current folder adalah folder dimana file *EvaluasiIndividu.m* tersimpan.



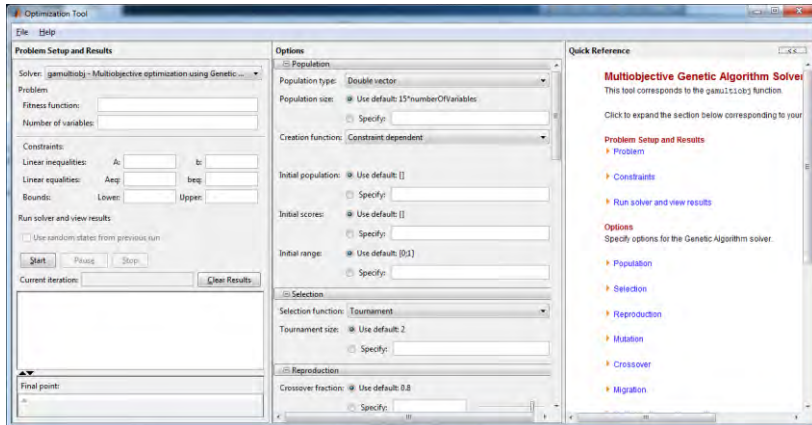
Gambar 5. 1 Mengakses *Optimization Toolbox*

Toolbox optimasi *gamultiobj* juga dapat dipanggil melalui *command window* Matlab dengan menetikkan '*optimtool('gamultiobj')*' lalu menekan tombol Enter.



Gambar 5. 2 Memanggil *Toolbox gamultiobj*

Kemudian akan muncul jendela baru *optimization tool* dengan metode *gamultiobj* seperti pada Gambar 5.3.



Gambar 5. 3 Jendela *Optimization Tool*

Jendela ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *Problem Setup and Results*, *Options* dan *Quick Reference*. Kelebihan dari menggunakan cara ini adalah tampilannya yang *user-friendly*. Untuk pengguna pemula dapat menggunakannya dengan mudah. Penjelasan tiap parameter disertakan juga pada *Quick Reference* yang terletak di bagian kanan jendela utama optimasi ini.

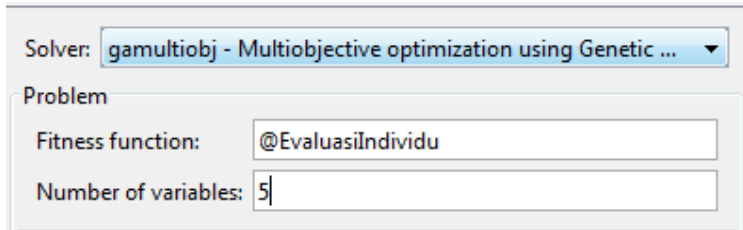
- *Problem Setup and Results*

Pada bagian yang terletak di sebelah kiri ini akan diisi fungsi tujuan, batasan, dan hasil dari *running* program optimasi.

a. *Problem*

Kolom *Problem* ini akan diisi dua komponen utama dari algoritma genetika, yaitu *fitness function* dan *number of variables* yang diisi jumlah variabel keputusan pada model. Pada kolom *fitness function* kita akan memanggil file *EvaluasiIndividu.m* yang telah berisi rumus untuk menghitung fungsi

tujuan. Tuliskan nama file fungsi tujuan dengan menambahkan '@' diawal.



Solver: **gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic ...**

Problem

Fitness function: **@EvaluasiIndividu**

Number of variables: **5**

Gambar 5. 4 Kolom Problem

b. *Constraints*

Kolom *Constraints* ini berisikan batasan-batasan yang digunakan dalam model optimasi. Terdapat tiga jenis batasan dalam *gamultiobj*, yaitu *linear inequalities*, *linear equalities* dan *bounds*. Untuk permasalahan optimasi konfigurasi sistem tenaga hibrida, kolom ini akan diisi nilai batasan seperti pada Subbab 4.1.3. Berikut ini penjelasan dari setiap batasan.

1) *Linear inequalities*

Merupakan batasan yang berupa fungsi pertidaksamaan. Bentuk utamanya adalah $A \cdot x \leq b$ dimana ditulis dalam matriks A and vektor b . Panjang matriks A harus sama dengan jumlah variabel keputusan.

2) *Linear equalities*

Merupakan batasan yang berupa fungsi persamaan. Bentuk utamanya adalah $Aeq \cdot x = beq$ dimana ditulis dalam matriks Aeq and vektor beq . Panjang matriks Aeq harus sama dengan jumlah variabel keputusan.

3) *Bounds*

Merupakan batasan bawah (*Lower*) dan batasan atas (*Upper*) dari sebuah variabel.

Constraints:				
Linear inequalities:	A:	<input type="text" value="[0 1 0 0 0]"/>	b:	<input type="text" value="0.4"/>
Linear equalities:	Aeq:	<input type="text" value="[1 1 1 0 0]"/>	beq:	<input type="text" value="1"/>
Bounds:	Lower:	<input type="text" value="[0 0 0 1 1]"/>	Upper:	<input type="text" value="[1 1 1 5 5]"/>

Gambar 5. 5 Kolom *Constraints*

c. *Run Solver and View Results*

Pada bagian ini digunakan untuk menjalankan *Solver* dengan menekan tombol *Start* serta setelah itu dapat melihat hasil dari optimasi *gamultiobj* yang dilakukan. Hasil jumlah iterasi dapat dilihat pada kolom *Current Iteration*. Dan hasil nilai variabel dan fungsi tujuan pada saat akhir akan muncul dibagian *Final Point*.

Run solver and view results	
<input type="checkbox"/> Use random states from previous run	
<input type="button" value="Start"/>	<input type="button" value="Pause"/> <input type="button" value="Stop"/>
Current iteration: <input type="text"/>	<input type="button" value="Clear Results"/>
Final point:	

Gambar 5. 6 Kolom *Run Solver and View Results*

- *Options*

Pada bagian yang terletak di tengah berisikan pilihan parameter *Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA)* seperti jumlah populasi, pindah silang, mutasi dan lain sebagainya.

- a. *Population*

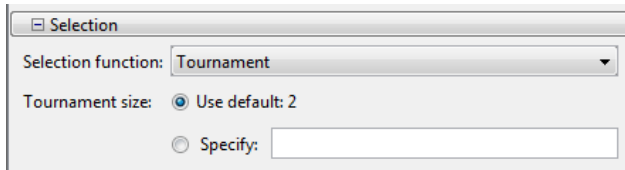
Pada bagian ini pengguna dapat memilih nilai parameter dalam pembentukan populasi. Tipe populasi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *double vector* sedangkan ukuran populasi yang digunakan dalam proses uji coba nanti adalah 50, 75 dan 100.

Gambar 5. 7 Kolom *Population*

- b. *Selection*

Bagian ini pengguna dapat menentukan metode yang digunakan dalam proses pemilihan *parent* untuk generasi berikutnya. Khusus pada *toolbox gamultiobj*

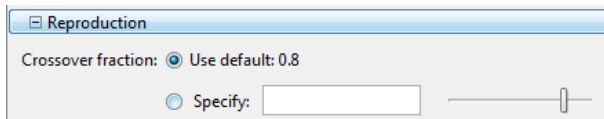
ini Matlab hanya menyediakan pilihan metode *Tournament*. Selain dengan metode *Tournament*, pengguna dapat menggunakan kode tersendiri untuk proses seleksi, lalu file dapat dipanggil dengan pada kolom *Custom*.



Gambar 5. 8 Kolom *Selection*

c. *Reproduction*

Pada bagian ini digunakan untuk menentukan bagaimana algoritma genetika menciptakan anak-anak pada setiap generasi baru. Nilai probabilitas pindah silang dapat dimasukkan pada kolom yang tersedia atau dengan menggeser *slider*

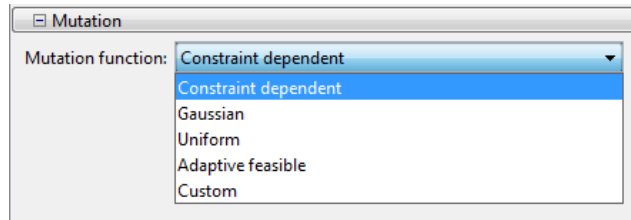


Gambar 5. 9 Kolom *Reproduction*

d. *Mutation*

Pada bagian ini dapat memilih fungsi mutasi yang digunakan dalam proses algoritma genetika. Fungsi mutasi sendiri berguna untuk membuat perubahan acak kecil di individu dalam populasi, yang menyediakan keragaman genetik dan memungkinkan algoritma genetika untuk mencari ruang yang lebih luas. Untuk permasalahan *gamultiobj* yang memiliki

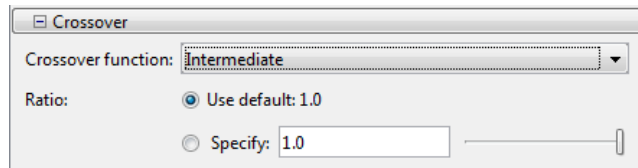
batasan hanya dapat menggunakan metode mutasi *adaptive feasible*.



Gambar 5. 10 Kolom Mutation

e. *Crossover*

Proses pindah silang atau *crossover* adalah proses menggabungkan dua individu, atau orang tua, untuk membentuk individu baru, atau anak, untuk generasi berikutnya. Metode pindah silang serta parameternya dapat dipilih pada kolom *Crossover function*.

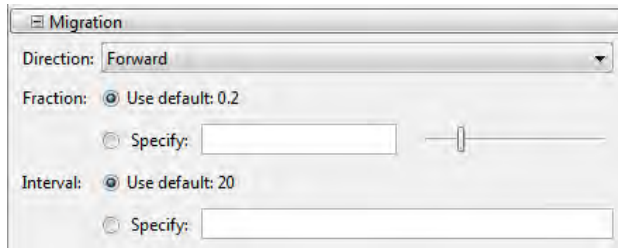


Gambar 5. 11 Kolom Crossover

f. *Migration*

Merupakan gerakan individu antara subpopulasi yang akan terjadi jika ukuran populasi diatur menjadi vektor dengan panjang lebih besar dari 1. Dalam prosesnya, individu-individu terbaik dari satu subpopulasi menggantikan individu terburuk dalam subpopulasi lain. Dengan mengubah nilai parameter

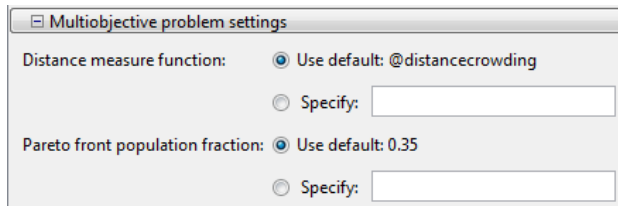
dalam *Migration* ini dapat mengontrol bagaimana migrasi terjadi.



Gambar 5. 12 Kolom *Migration*

g. *Multiobjective problem settings*

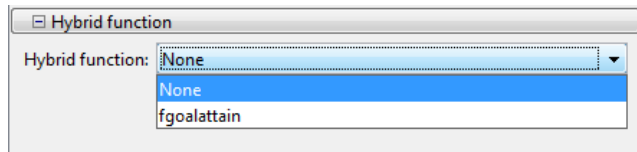
Pengaturan ini adalah terkait menentukan parameter khusus yang ada pada algoritma genetik khusus masalah multi-obyektif. Dua pilihan '*ParetoFraction*' dan '*DistanceFcn*' digunakan untuk mengontrol proses elitisme. *ParetoFraction* membatasi jumlah individu di *Pareto front* (anggota elit) dan *DistanceFcn* membantu untuk mempertahankan keragaman populasi. *ParetoFraction* memiliki nilai default 0,35. Artinya program akan mencoba untuk membatasi jumlah individu dalam populasi saat ini yang berada di *Pareto Front* sampai 35 persen dari jumlah penduduk.



Gambar 5. 13 Kolom *Multiobjective Problem Settings*

h. *Hybrid Function*

Pada bagian ini dapat ditambahkan fungsi lainnya untuk dikombinasikan dengan *gamultiobj*. Fungsi yang dapat digunakan adalah *fgoalattain*, yang mana menggunakan perhitungan bobot: bobot masing-masing tujuan skala antara 0 dan 1.



Gambar 5. 14 Kolom *Hybrid Function*

i. *Stopping Criteria*

Pada bagian ini digunakan untuk mengatur kriteria apa saja yang dapat menyebabkan algoritma untuk berakhir iterasinya. Untuk model *gamultiobj* digunakan tiga kriteria untuk menentukan berhentinya iterasi. Program akan berhenti hanya jika memenuhi kriteria ini. Yang pertama adalah jumlah maksimum generasi (*Stall Gen limit*), lalu kedua jika nilai rata-rata perubahan pada *Pareto front* kurang dari batas toleransi pada menu *option*, dan yang terakhir adalah batas waktu maksimum (*time limit in seconds*).

Stopping criteria

Generations: ☒ Use default: 200*numberOfVariables
☐ Specify:

Time limit: ☒ Use default: Inf
☐ Specify:

Fitness limit: ☒ Use default: -Inf
☐ Specify:

Stall generations: ☒ Use default: 100
☐ Specify:

Function tolerance: ☒ Use default: 1e-4
☐ Specify:

Gambar 5. 15 Kolom Stopping Criteria

j. *Plot Function*

Bagian ini untuk memilih grafik apa saja yang akan ditampilkan selama iterasi berjalan. Setiap grafik akan digambarkan pada sumbu terpisah dalam tampilan jendela.

Plot functions

Plot interval:

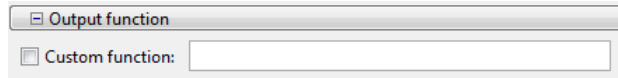
☐ Distance ☐ Genealogy ☐ Score diversity
☐ Selection ☐ Stopping ☐ Pareto front
☐ Average Pareto distance ☐ Rank histogram ☐ Average Pareto spread
☐ Custom function:

Gambar 5. 16 Kolom Plot Function

k. *Output Function*

Merupakan fungsi yang akan dipanggil oleh algoritma genetika pada setiap iterasi. Untuk menggunakan

fungsi output ini , masukkan nama file function misal: @outputfunction pada kolom *Custom function*.

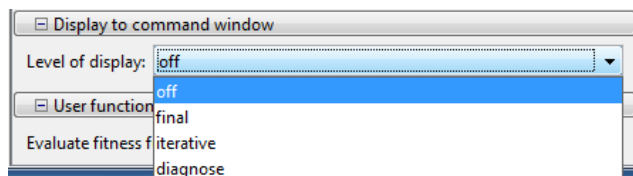


Gambar 5. 17 Kolom *Output Function*

1. *Display to Command Window*

Pada bagian ini, dapat dipilih informasi terkait proses *gamultiobj* yang sedang berjalan pada layar *Command Window*. Berikut ini adalah pilihan yang disediakan oleh toolbox ini.

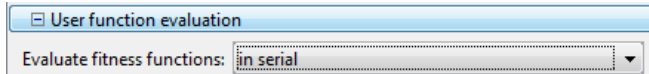
- *Off* - Tidak menampilkan output.
- *Iterative* - Menampilkan informasi pada setiap iterasi dari algoritma
- *Diagnose* - Menampilkan informasi pada setiap iterasi. Selain itu, daftar diagnostik informasi beberapa masalah dan pilihan yang dirubah dari *default*.
- *Final* – Hanya menampilkan alasan berhenti iterasi pada akhir proses *running*



Gambar 5. 18 Kolom *Display to Command Window*

m. *User Function Evaluation*

Pilihan untuk menentukan bagaimana proses evaluasi dari *fitness function* yang diperhitungkan.



Gambar 5. 19 Kolom *User Function*

5.1.3 *Running Algoritma Menggunakan File Main.m*

File *main.m* merupakan file yang mengintegrasikan semua file, meliputi inisialisasi data, membuat variabel keputusan, batas atas, batas bawah, batasan, dan mengeksekusi fungsi optimasi *gamultiobj*. Dengan menggunakan file yang terpisah ini akan memudahkan pengguna karena tidak perlu untuk mengisikan ulang kolom-kolom seperti ketika menggunakan jendela *toolbox* optimasi.

Seperti yang ada pada segmen program 5.6 dapat diketahui fungsi dan variabel apa saja yang harus dimasukkan dalam fungsi tersebut, diantaranya adalah :

1. Fungsi tujuan yang berasal dari file *EvaluasiIndividu.m*.
2. Variabel *nvars* yang merupakan jumlah variabel atau gen dalam satu kromosom.
3. Variabel *A* merupakan tempat untuk batasan yang berbentuk pertidaksamaan.
4. Tanda *b* merupakan nilai atau kapasitas dari batasan yang berbentuk pertidaksamaan.
5. Variabel *Ae* adalah batasan yang berbentuk persamaan.
6. Variabel *be* merupakan nilai kapasitas dari batasan yang berbentuk persamaan.

7. Variabel lb merupakan batas bawah model
8. Variabel ub merupakan batas atas model.

```

1. ObjectiveFunction = @EvaluasiIndividu;
2. nvars = 5;
3. LB = [0 0 0 1 1];
4. UB = [1 1 1 5 5];
5. A = [0 1 0 0 0];
6. b = 0.4;
7. Aeq = [1 1 1 0 0];
8. beq = 1;
9. rng(1, 'twister') % for reproducibility
10. %options = gaoptimset('PopulationSize', 150);
11. %options =
    gaoptimset(options, 'Generations', 150, 'StallGenLim
        it', 140);
12. options =
    gaoptimset('PlotFcns', {@gaplotpareto, @gaplotscore
        diversity});
13. [x, fval] =
    gamultiobj(ObjectiveFunction, nvars, A, b, Aeq, beq, LB
        , UB, options);

```

Segmen Program 5. 6 File main.m

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VI

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menjelaskan proses pengujian terhadap model yang telah diimplementasikan dalam program. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa pendekatan algoritma genetika dapat dijadikan metode dalam penyelesaian masalah optimasi perancangan sistem tenaga hibrida pada BTS ini.

6.1 Lingkungan Uji Coba

Lingkungan uji coba ini menjelaskan mengenai lingkungan pengujian yang digunakan untuk melakukan implementasi tugas akhir ini. Lingkungan uji coba meliputi perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan. Spesifikasi perangkat lunak dan perangkat keras yang digunakan ditunjukkan pada tabel 6.1 berikut.

Tabel 6. 1 Perangkat Keras Lingkungan Uji Coba

Perangkat Keras	Spesifikasi
Jenis	Notebook
Processor	Core i3
RAM	4GB
Hard Disk Drive	500GB

Selain itu juga terdapat lingkungan perangkat lunak yang digunakan dalam uji coba model. Tabel 6.2 berikut adalah daftar perangkat lunak yang digunakan dalam uji coba.

Tabel 6. 2 Perangkat Lunak Lingkungan Uji Coba

Perangkat Lunak	Fungsi
Windows 7	Sistem operasi
Matlab R2013a	Membuat kode program Melakukan optimasi
Microsoft Excel 2010	Mengelola data
QM	Validasi Model

6.2 Skenario Uji Coba

Uji coba terhadap model optimasi dilakukan dengan mengubah parameter inputan pada proses optimasi algoritma genetika. Sehingga didapatkan kombinasi terbaik dari parameter algoritma genetika multi-obyektif yang dapat menghasilkan solusi optimal terbaik.

Pada proses uji coba model ini dibuatlah beberapa skenario uji coba yang akan dilakukan. Skenario-skenario ini berbeda satu sama lain bergantung pada parameter apa yang akan diuji. Tujuan utama dari skenario uji coba adalah mencari parameter algoritma genetika multi-obyektif yang menghasilkan total biaya operasi tahunan ($ACoe$) dan jumlah emisi karbon (CE) minimal yang dihasilkan oleh sistem tenaga hibrida pada BTS Pulau Bawean Tambak. Berikut ini adalah skenario uji coba yang akan dilakukan pada tugas akhir ini.

1. Perbandingan nilai $ACoe$ dan CE yang dihasilkan dari proses optimasi algoritma genetika multi-obyektif berdasarkan parameter jumlah populasi ($Npop$) dengan nilai 50, 75 dan 100.
2. Perbandingan nilai $ACoe$ dan CE yang dihasilkan dari proses optimasi algoritma genetika multi-obyektif berdasarkan parameter probabilitas pindah silang (P_c) dengan nilai 0,1 – 0,9

6.3 Hasil Uji Coba

Untuk model optimasi *single objective*, penyelesaian optimasi algoritma genetika menghasilkan hanya satu solusi optimal. Sedangkan pada akhir proses optimasi (ketika generasi terakhir dari *gamultiobj* dievaluasi), solusi yang dihasilkan terdiri dari beberapa solusi yang disebut *best Pareto Front*. Solusi pada *best Pareto Front* merupakan solusi terbaik yang mempertimbangkan kedua tujuan secara bersamaan. Setiap solusi pada *best Pareto Front* memiliki kombinasi proporsi penggunaan PVBAT – PLN – Generator Diesel, dengan nilai biaya operasi (*ACoe*) sebagai *fitness 1* dan jumlah emisi karbon (*CE*) sebagai *fitness 2* yang berbeda-beda. Beberapa solusi memiliki nilai *fitness 1* yang rendah namun *fitness 2* yang tinggi, ada juga solusi yang sebaliknya.

Pada pembahasan hasil uji coba akan digunakan nilai solusi ekstrim yang dihasilkan oleh proses optimasi sebagai pembanding antara hasil skenario satu dengan yang lainnya. Solusi ekstrim terdiri dari solusi L (*left*) yang memiliki nilai emisi yang paling rendah dan total biaya paling tinggi, solusi R (*right*) solusi dengan total biaya paling rendah dan nilai emisi paling tinggi dan solusi C (*centre*) yang memiliki nilai di tengah-tengah dari *best Pareto front*. Artinya solusi L menitikberatkan pada fungsi tujuan total emisi agar nilainya seminimal mungkin dan hal ini berlaku sebaliknya untuk solusi R. Berikut ini adalah hasil dari uji coba yang telah dilakukan.

6.3.1. Perbandingan Total Biaya ($ACoe$) dan Emisi Karbon (CE) Berdasarkan Parameter Nilai Populasi

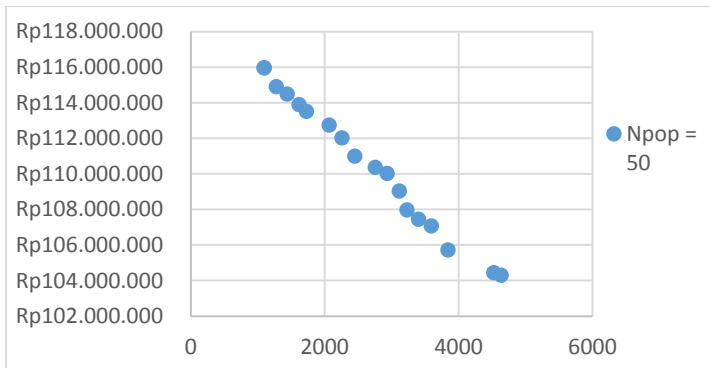
Proses Algoritma Genetika menggunakan solusi awal acak maka masing-masing pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dan merata-rata hasil sebagai solusi optimal. Uji coba dilakukan dengan mengganti parameter nilai populasi ($Npop$) menjadi 50, 75 dan 100 dan parameter yang lainnya dengan nilai *default* pada Matlab. Luaran hasil optimasi dilampirkan pada Lampiran A Tabel A.1, Tabel A.2, dan Tabel A.3.

Tabel 6. 3 Uji Coba dengan Parameter $Npop = 50, 75, 100$

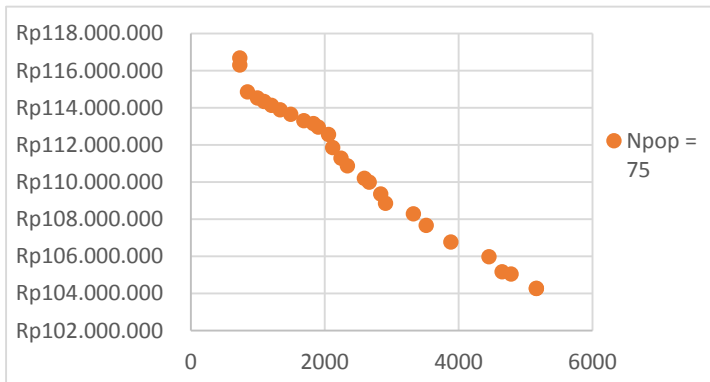
POP	Solusi	F1 ($ACoe$)	F2 (CE)
50	L	Rp115.960.857	1096,43
	C	Rp110.367.304	2754,96
	R	Rp104.294.803	4635,41
75	L	Rp116.692.448	734,25
	C	Rp111.289.520	2244,21
	R	Rp104.282.341	5163,37
100	L	Rp116.348.657	745,35
	C	Rp111.812.510	2154,14
	R	Rp104.628.743	4137,31

Pada Tabel 6.3 ditampilkan nilai solusi ekstrim dari hasil uji coba dengan merubah parameter nilai jumlah populasi ($Npop$). Nilai emisi terendah pada solusi L dan total biaya terendah solusi R berada pada parameter $Npop = 75$ dengan nilai 734,25 dan Rp 104.282.241. Sedangkan nilai terbaik bagi solusi C adalah pada parameter $Npop = 75$, memperhatikan

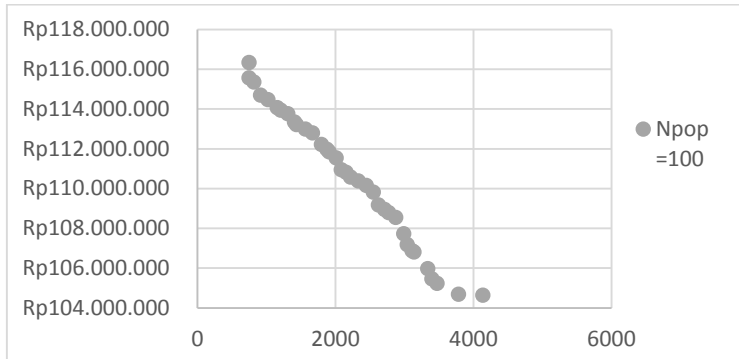
seimbangnya antara total biaya dan nilai emisi, dengan nilai Rp 111.496.695 dan 2140,364.



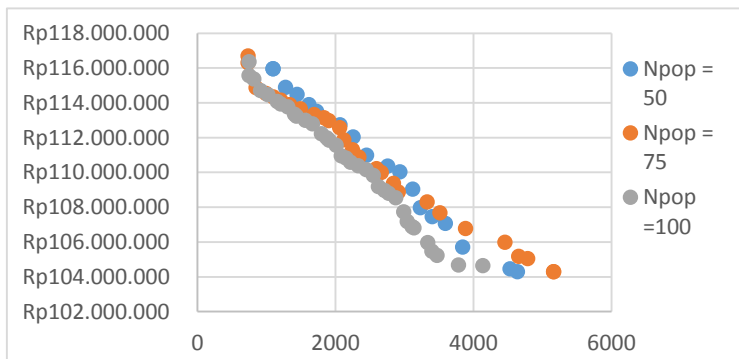
Gambar 6. 1 Grafik Persebaran $Npop = 50$



Gambar 6. 2 Grafik Persebaran $Npop = 75$



Gambar 6. 3 Grafik Persebaran $Npop = 100$



Gambar 6. 4 Perbandingan Persebaran antara $Npop = 50, 75$ & 100

Pada Gambar 6.4 menampilkan hasil dari solusi dengan nilai populasi yang berbeda-beda, yaitu 50, 75 dan 100. Dari ketiga parameter tersebut, yang menghasilkan hasil persebaran yang paling baik adalah pada $Npop = 100$.

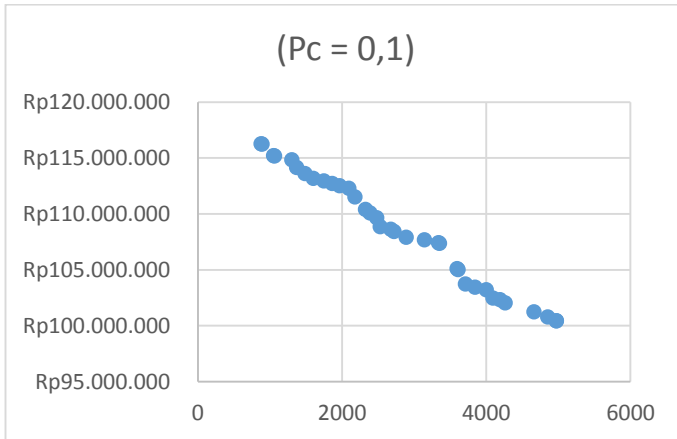
6.3.2. Perbandingan Total Biaya ($ACoe$) dan Emisi Karbon (CE) Berdasarkan Parameter Nilai Probabilitas Pindah Silang

Proses Algoritma Genetika menggunakan solusi awal acak maka masing-masing pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dan merata-rata hasil sebagai solusi optimal. Uji coba dilakukan dengan mengganti parameter nilai probabilitas pindah silang (P_c) menjadi antara 0,1 sampai dengan 0,9, nilai populasi (N_{pop}) = 100 (nilai optimal di skenario 1) dan parameter yang lainnya dengan nilai *default* pada Matlab.

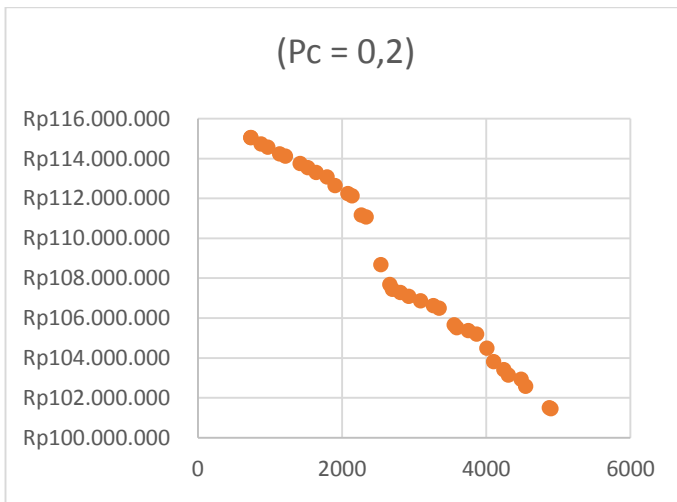
Pada tabel 6.6 ditampilkan hasil dari uji coba dengan menggunakan parameter nilai $P_c = 0,1-0,9$ dan $N_{pop} = 100$. Nilai emisi terendah pada solusi L berada pada parameter $P_c = 0,4$ dengan nilai 734,198. Total biaya terendah solusi R berada pada parameter $P_c = 0,1$ dengan nilai Rp 100.499.794. Begitu juga dengan nilai terbaik bagi solusi C adalah pada parameter $P_c = 0,7$ dengan memperhatikan seimbangannya antara total biaya dan nilai emisi dengan nilai Rp 109.638.760 dan 2775,414.

Tabel 6. 4 Perubahan Parameter nilai P_c pada $N_{pop} = 100$

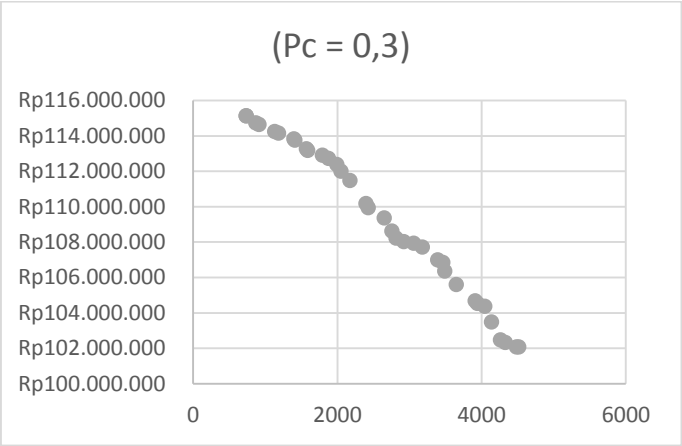
Pc	Solusi	F1	F2
0,1	L	Rp115.107.946	1227,4
	C	Rp108.614.692	2677,244
	R	Rp100.449.794	4972,144
0,2	L	Rp115.058.455	734,28
	C	Rp106.324.908	2973,752
	R	Rp104.060.199	4894,792
0,3	L	Rp115.124.463	734,226
	C	Rp107.850.415	3179,892
	R	Rp105.134.557	4518,214
0,4	L	Rp115.068.629	734,198
	C	Rp107.929.356	2912,486
	R	Rp103.841.518	5970,744
0,5	L	Rp115.866.591	734,238
	C	Rp110.266.576	2392,606
	R	Rp106.314.466	4688,468
0,6	L	Rp115.036.748	903,658
	C	Rp109.611.133	3401,766
	R	Rp105.559.426	4799,294
0,7	L	Rp115.195.970	1068,734
	C	Rp109.638.760	2775,414
	R	Rp104.752.578	4840,03
0,8	L	Rp116.348.657	745,35
	C	Rp110.812.509	2154,139
	R	Rp104.628.743	4137,309
0,9	L	Rp118.032.259	762,37
	C	Rp109.874.586	2642,462
	R	Rp105.570.638	5848,308



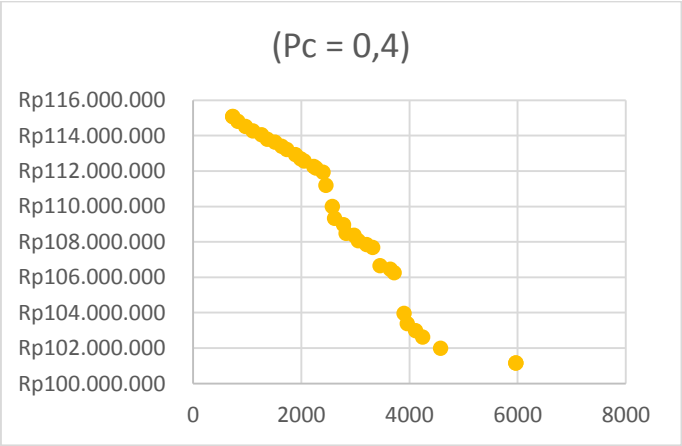
Gambar 6. 5 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,1$



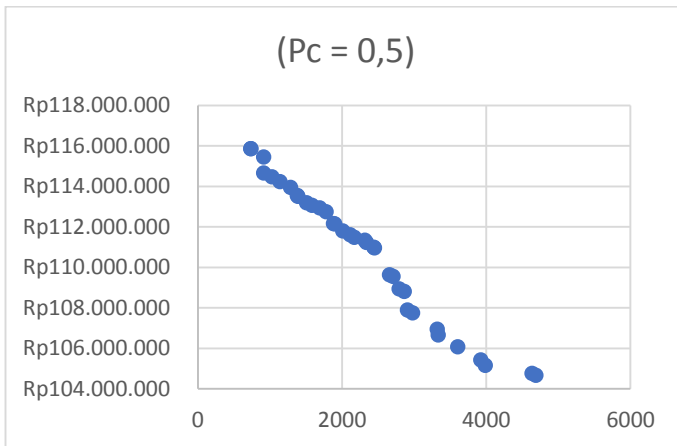
Gambar 6. 6 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,2$



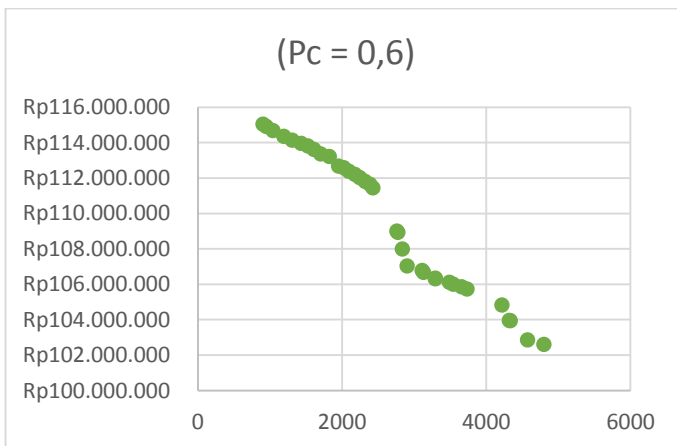
Gambar 6. 7 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,3$



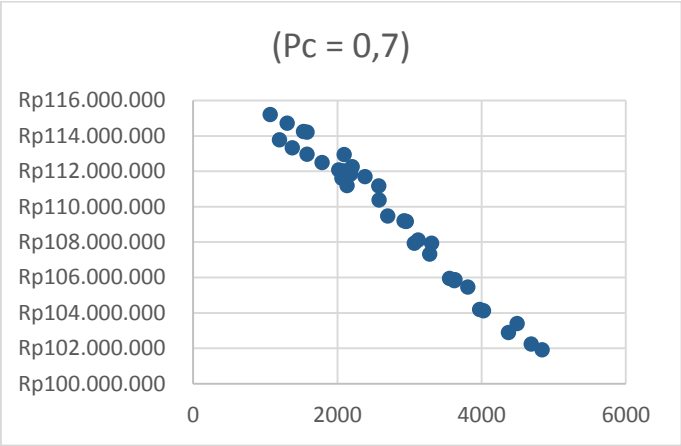
Gambar 6. 8 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,4$



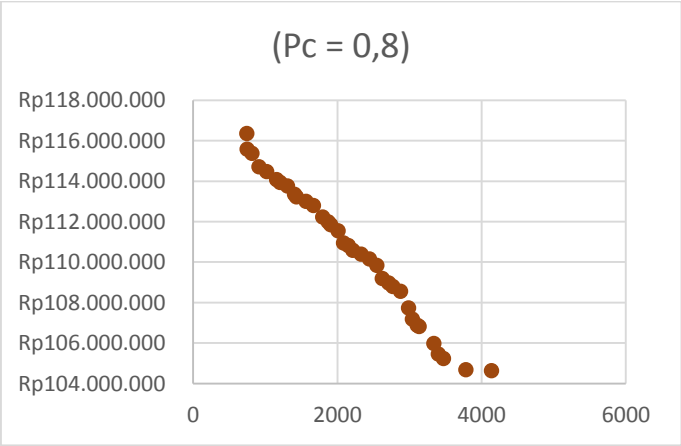
Gambar 6. 9 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,5$



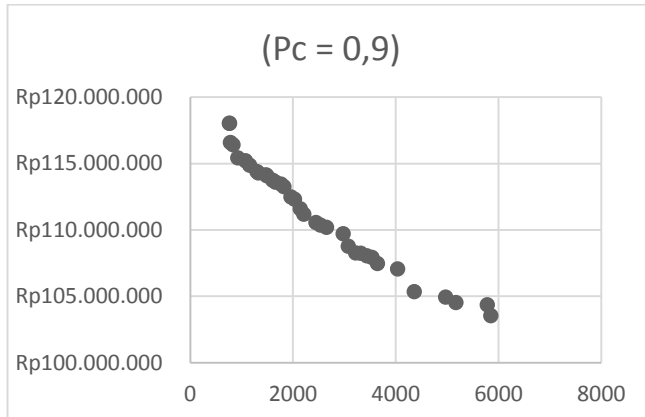
Gambar 6. 10 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,6$



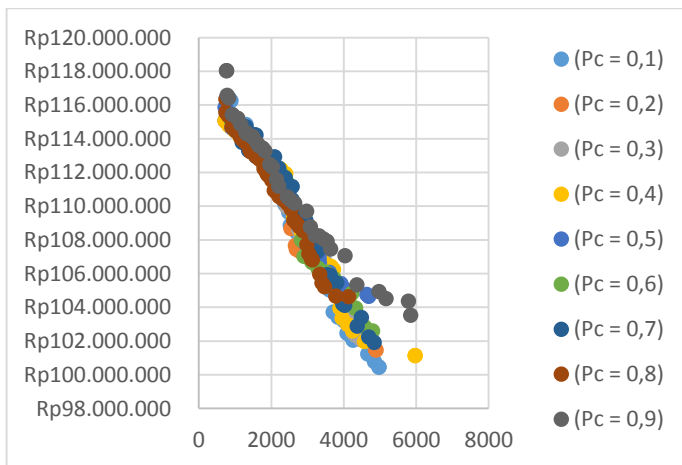
Gambar 6. 11 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,7$



Gambar 6. 12 Grafik Persebaran Npop = 100 dan $P_c = 0,8$



Gambar 6. 13 Grafik Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,9$



Gambar 6. 14 Perbandingan Persebaran $N_{pop} = 100$ dan $P_c = 0,1-0,9$

Pada Gambar 6.14 menampilkan grafik *Pareto Front* hasil dari proses optimasi *gamultiobj* dengan nilai populasi $N_{pop} = 100$ dan nilai P_c yang beragam

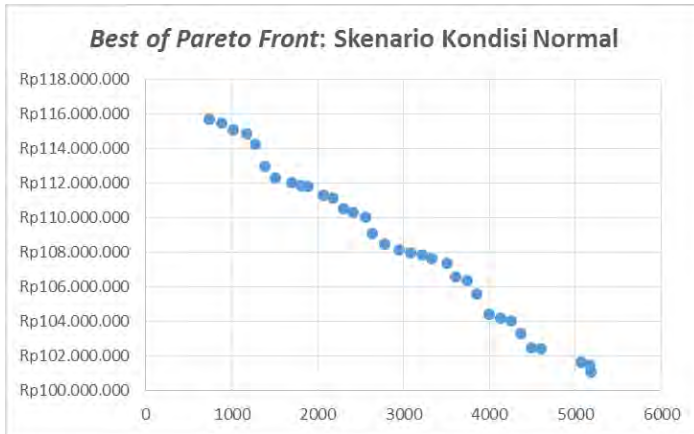
antara 0,1-0,9. Dari ketiga parameter tersebut, yang menghasilkan hasil persebaran yang paling baik adalah pada $Npop = 100$ dan $Pc = 0,8$.

6.4 Hasil Optimasi dengan Algoritma Multi-Obyektif

Pada bagian ini akan dilakukan penyelesaian masalah dengan menggunakan parameter Algoritma Genetika Multi-Obyektif yang telah dilakukan uji coba. Berdasarkan hasil uji coba yang telah dilakukan total biaya yang paling rendah didapat dari percobaan dengan parameter $Pc = 0,8$ dan $Npop = 100$. Sehingga untuk proses optimasi ini digunakan parameter yang sama dengan saat uji coba. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 4.2.1, optimasi perancangan konfigurasi sistem tenaga hibrida pada BTS Pulan Bawean Tambak dilakukan pada dua skenario kondisi paparan sinar matahari, yaitu hari terang dan hari mendung. Berikut ini adalah hasil dari proses optimasi menggunakan model Algoritma Genetika Multi-Obyektif yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini.

6.4.1 Optimasi pada Skenario Kondisi Normal

Hasil dari optimasi *gamultiobj* untuk skenario kondisi normal adalah 35 titik optimal *Pareto front* dengan jumlah iterasi sebanyak 110 generasi. Hasil *Pareto front* dapat dilihat pada bagian lampiran Tabel A-13. Gambar 6.15 adalah grafik dari *best of Pareto front* yang berisi solusi optimal pada akhir iterasi.



Gambar 6. 15 Grafik *Best of Pareto Front* Skenario Kondisi Normal

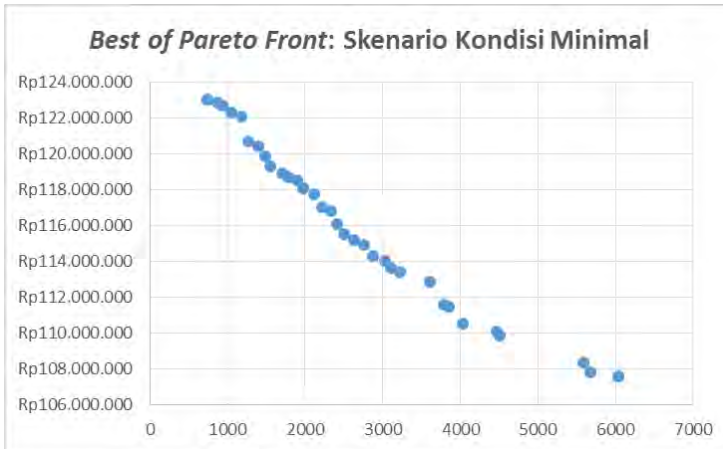
Pada Tabel 6.5 ditampilkan hasil dari solusi ekstrim dari *best Pareto front*. Solusi L (*left*) memiliki biaya terendah dan emisi tertinggi, dan solusi R (*right*) memiliki biaya tertinggi dan emisi terendah. Sebagai tambahan disertakan solusi C (*center*) yang merupakan solusi dengan keadaan seimbang.

Tabel 6. 5 Solusi Ekstrim Optimasi pada Skenario Kondisi Normal

Solusi	Biaya $ACoe$	Emisi Karbon	Proporsi Suplai Energi Listrik			Tipe	
			PV	PLN	Gen set	PV	Bat
	(Rp)	(kg CO ₂)	(%)	(%)	(%)		
L	115.688.062	734,11	100	0	0	(3)	(3)
C	108.444.697	2779,18	82	17	1	(2)	(4)
R	101.101.449	5181,78	62	35	3	(2)	(2)

6.4.2 Optimasi pada Skenario Kondisi Minimal

Hasil dari optimasi *gamultiobj* untuk skenario kondisi minimal adalah 35 titik optimal *Pareto front* dengan jumlah iterasi sebanyak 113 generasi. Hasil *Pareto front* dapat dilihat pada bagian lampiran Tabel A-14. Gambar 6.16 adalah grafik dari *best of Pareto front* yang berisi solusi optimal pada akhir iterasi.



Gambar 6. 16 Grafik *Best of Pareto Front* Skenario Kondisi Minimal

Pada Tabel 6.9 ditampilkan hasil dari solusi ekstrim dari *best Pareto front*. Solusi L (*left*) memiliki biaya tertinggi dan emisi terendah, dan solusi R (*right*) memiliki biaya terendah dan emisi tertinggi. Sebagai tambahan disertakan solusi C (*center*) yang merupakan solusi dengan keadaan seimbang.

Tabel 6. 6 Solusi Ekstrem Optimasi pada Skenario Kondisi Minimal

Sol usi	Biaya $ACoe$	Emisi Karbon	Proporsi Suplai Energi Listrik			Tipe	
			PV	PLN	Gen set	PV	Bat
	(Rp)	(kg CO ₂)	(%)	(%)	(%)		
L	123.036.021	734,18	100	0	0	(3)	(3)
C	116.063.839	2417	85	15	0	(1)	(2)
R	107.612.023	6044,49	55	33	12	(1)	(2)

6.5 Validasi Model

Proses validasi dilakukan untuk memastikan apakah model dan program yang telah dibuat sudah sesuai dengan tujuan yang diharapkan. Salah satu cara untuk melakukan validasi adalah dengan membandingkan antara hasil yang dikeluarkan program yang telah dibuat dengan hasil yang dikeluarkan perangkat lunak yang sudah ada. Apabila hasil yang dikeluarkan sama atau berada di tingkat kesalahan (*error*) yang diperbolehkan maka dapat dikatakan model dan program sudah valid. Pada tugas akhir ini validasi akan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak QM dengan pendekatan *Linear Programming*. Model optimasi akan disesuaikan dengan model *Linear Programming* dan dimasukkan ke dalam program QM.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada model optimasi dengan menggunakan *gamultiobj* pada Matlab tidak menghasilkan solusi tunggal melainkan sekumpulan titik optimal. Untuk proses validasi ini akan menggunakan nilai rata-rata dari masing-masing variabel sebagai data hasil optimasi program *gamultiobj*. Model yang dimasukkan

ke dalam program QM dengan modul *Linear Programming* dapat dilihat pada Gambar 6.17.

	X1	X2	X3	VarBiaya	VarEmisi		RHS	Equation form
Minimize	0	0	0	1	1			Min VarBiaya + VarEmisi
Biaya	-6.499	-1.711	-8.177	1	0	=	0	$-6499X1 - 1711X2 - 8177X3 +$
Batasan 1	1	1	1	0	0	=	43,2	$X1 + X2 + X3 = 43.2$
Emisi	-.04	-.78	-.88	0	1	=	0	$-.04X1 -.78X2 -.88X3 +$
Batasan 2	0	1	0	0	0	<=	17	$X2 <= 17$

Gambar 6. 17 Validasi Model dengan QM

Hasil optimasi *gamultiobj* yang digunakan untuk proses validasi ini adalah hasil pada skenario hari terang. Variabel y1 dan y2 pada model optimasi Algoritma Genetika yang dibuat pada Tugas Akhir ini tidak dimasukkan dalam model validasi. Untuk biaya energi PV&BAT diasumsikan menggunakan tipe panel dan baterai yang sama dengan hasil yang dikeluarkan proses optimasi *gamultiobj* dengan Matlab. Setelah semua model optimasi dimasukkan maka langkah selanjutnya adalah melakukan proses *running* dengan cara menekan tombol “Solve”. Sehingga program QM akan mengeluarkan solusi optimal seperti pada Gambar 6.18.

	X1	X2	X3	VarBiaya	VarEmisi		RHS	Dual
Minimize	0	0	0	1	1			
Biaya	-6.499	-1.711	-8.177	1	0	=	0	-1
Batasan 1	1	1	1	0	0	=	43,2	-6.499,041
Emisi	-.04	-.78	-.88	0	1	=	0	-1
Batasan 2	0	1	0	0	0	<=	17	4.787,261
Solution->	26,2	17	0	199.360,8	14,308		199.375,1	

Gambar 6. 18 Hasil *Linear Programming* QM

Selanjutnya akan dibandingkan nilai solusi optimal yang dihasilkan dengan program *gamultiobj* yang dibuat dengan luaran hasil *Linear Programming* QM, disajikan pada Tabel 6.7 dibawah ini.

Tabel 6. 7 Perbandingan Hasil Optimasi *gamultiobj* dengan QM

Var. Keputusan	<i>Linear Programming</i> QM		<i>gamultiobj</i>
	kWh	%	
x1	26,2	61	82
x2	17	39	16
x3	0	0	2

Untuk mengetahui tingkat validitas model, maka langkah berikutnya adalah menghitung nilai *Error Variance*. Model dikatakan valid apabila nilai $E2$ (*Error Variance*) $\leq 30\%$. Berikut adalah rumus menghitung nilai $E2$.

$$E2 = \frac{|Standart\ Deviasi\ Simulasi - Standart\ Deviasi\ Data|}{Standart\ Deviasi\ Data} \quad (25)$$

Dimana simulasi merupakan hasil *gamultiobj* dan data adalah hasil QM. Dalam pencarian nilai standar deviasi digunakan formula *stdev* pada excel. Setelah diketahui nilai standar deviasi masing-masing, maka selanjutnya menghitung nilai $E2$ dengan menggunakan rumus di atas.

Tabel 6. 8 Hasil Perhitungan *Error Variance*

	Program Komputer	<i>Linear</i> <i>Programming</i> QM
Standart Deviasi	30,89228598	42,14656965
E2	24,7027 %	

Hasil perhitungan nilai $E2$ ditunjukkan pada Tabel 6.8. Maka ditemukan bahwa nilai $E2$ (*Error Variance*) sebesar 24,7027%. Artinya model dan program yang dibuat telah valid karena nilai $E2$ kurang dari 30%.

6.6 Analisis Hasil Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida

Berdasarkan proses optimasi dengan Algoritma Multi-Obyektif yang telah dilakukan pada subbab 6.4 menghasilkan nilai proporsi atau persentase beban listrik yang akan dipenuhi oleh masing-masing sistem dengan mempertimbangkan total biaya dan total emisi karbon sistem. Sehingga konfigurasi sistem tenaga hibrida yang dirasa paling optimal untuk diterapkan pada BTS di Pulau Bawean Tambak adalah seperti pada Tabel 6.9 untuk kondisi paparan sinar matahari normal dan Tabel 6.10 untuk kondisi paparan sinar matahari minimal.

Tabel 6. 9 Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida Kondisi Normal

Solusi	Biaya $ACoe$ (Rp)	Emisi Karbon (kg CO ₂)	Ukuran Kapasitas		Genset ON (jam)	PLN ON (jam)
			PV (Wp)	Baterai (Ah)		
L	115.124.463	734,23	41 x 215	3 x 968	0	0
C	109.361.177	2651,12	35 x 210	2 x 1140	87	1469
R	102.079.479	4518,21	26 x 210	3 x 788	260	3024

Tabel 6. 10 Konfigurasi Sistem Tenaga Hibrida Kondisi Minimal

Solusi	Biaya $ACoe$ (Rp)	Emisi Karbon (kg CO ₂)	Ukuran Kapasitas		Genset ON (jam)	PLN ON (jam)
			PV (Wp)	Baterai (Ah)		
L	123.036.021	734,18	48 x 215	3 x 968	0	0
C	116.063.839	2417	43 x 205	4 x 788	0	1296
R	107.612.023	6044,49	28 x 205	2 x 788	1037	2851

Untu solusi dengan mengutamakan tujuan penghematan emisi karbon yaitu solusi L, listrik yang dialirkan pada beban BTS di Pulau Bawean Tambak dipasok secara penuh oleh sistem panel surya dan baterai tanpa menggunakan aliran listrik dari PLN maupun generator diesel. Namun biaya yang dihasilkan

lebih tinggi, dikarenakan pembelian komponen panel surya dan baterai yang lebih banyak untuk menutupi kekurangan listrik yang tidak dipasok oleh PLN dan genset. Kondisi sebaliknya terjadi pada solusi R dimana mengutamakan tujuan meminimalkan biaya. Biaya operasi lebih murah namun emisi karbon yang dihasilkan lebih banyak dikarenakan penggunaan generator berbahan bakar diesel dan aliran PLN yang belum menggunakan pembangkit listrik ramah lingkungan.

Pada kondisi sinar matahari minimal, biaya yang dikeluarkan lebih besar dibandingkan pada kondisi hari normal, hal itu dikarenakan lebih rendahnya paparan sinar matahari yang bisa ditangkap maka dibutuhkan panel dengan jumlah yang lebih banyak agar dapat mencukupi kebutuhan beban listrik. Hal ini terlihat apabila kita bandingkan kebutuhan jumlah panel surya pada kedua kondisi paparan matahari. Dengan nilai proporsi dan tipe panel surya yang digunakan sama namun jumlah panel yang dibutuhkan berbeda, yaitu 41 panel pada kondisi hari terang dan pada hari mendung dibutuhkan 7 panel tambahan.

Pada tabel 6.11 menampilkan biaya energi atau operasional tahunan dan tingkat emisi kondisi sistem tenaga listrik apabila tidak menggunakan sistem tenaga surya, yaitu dengan kapasitas maksimal PLN dapat memasok listrik dan sisanya akan dipenuhi oleh generator diesel.

Tabel 6. 11 Konfigurasi Sistem Tenaga Listrik Tanpa Panel Surya

Sistem Tenaga Listrik	Proporsi Pasokan	<i>ACoe</i>	<i>CE</i>
PLN	40%	Rp 11.101.992	4907,002
Generator Diesel	60%	Rp 74.862.000	8325,504
Total		Rp 85.963.992	13232,5056

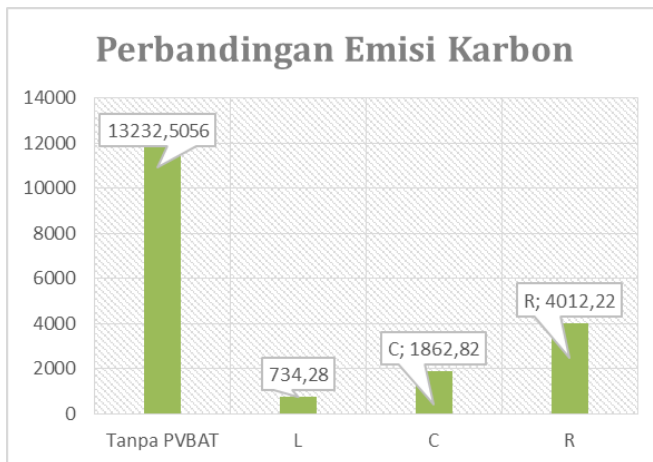
Biaya yang dikeluarkan lebih murah jika dibandingkan dengan penggunaan sistem tenaga hibrida hal ini dikarenakan biaya yang dikeluarkan untuk investasi pengadaan panel surya dan baterainya memang memakan biaya yang cukup besar. Sehingga pengimplementasian panel surya akan lebih terasa manfaat ekonomisnya jika dilihat dalam jangka panjang.

Pada tabel 6.12 ditampilkan hasil perbandingan konsumsi bahan bakar untuk generator diesel antara sistem tenaga hibrida dengan sistem PLN-Generator Diesel. Dengan menerapkan sistem tenaga hibrida maka perusahaan dapat melakukan penghematan pembelian bahan bakar hingga 100 % jika menerapkan solusi konfigurasi L, 98,3 % (33134,4 liter) pada solusi konfigurasi C dan 95 % (32011,2 liter) pada solusi konfigurasi R.

Tabel 6. 12 Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Diesel

Sistem	Konsumsi Bahan Bakar Diesel	
Tenaga Hibrida (Kondisi Hari Terang)	L	0 liter
	C	561,6 liter
	R	1684,8 liter
PLN-Generator Diesel	33696 liter	

Selain itu manfaat lain dari penggunaan sistem panel surya adalah pengurangan emisi karbon yang dihasilkan oleh sistem tenaga listrik. Hal ini sangat terlihat pada Gambar 6.19 jika dibandingkan antara sistem PLN-Diesel dengan sistem panel surya yang bekerja *stand-alone* (L), emisi karbon yang dihasilkan oleh sistem PLN-Diesel 18 kali lebih besar. Dengan menggunakan panel surya diharapkan dapat menghemat penggunaan bahan bakar tidak ramah lingkungan.



Gambar 6. 19 Grafik Perbandingan Emisi Karbon

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dijabarkan mengenai kesimpulan dari keseluruhan proses tugas akhir yang dilakukan. Serta dijabarkan saran berkaitan dengan pengembangan kedepannya untuk jenis penelitian yang serupa

7.1 Kesimpulan

Dari keseluruhan proses pengerjaan tugas akhir yang dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan yaitu :

1. Metode Algoritma Genetika Multi-Obyektif mampu menjadi metode penyelesaian untuk kasus pengoptimalan konfigurasi sistem tenaga hibrida BTS Pulau Bawean Tambak
2. Pada studi kasus konfigurasi sistem tenaga hibrida BTS Pulau Bawean Tambak, parameter Algoritma Genetika Multi-Obyektif yang memberikan solusi paling optimal adalah $P_c = 0,3$ dan $N_{pop} = 100$
3. Hasil optimasi dengan menggunakan model Algoritma Genetika Multi-Obyektif didapatkan nilai proporsi pembagian beban listrik di masing-masing sistem sumber catu daya dan ukuran panel surya serta baterai yang dibutuhkan
4. Nilai proporsi hasil dari proses optimasi pemenuhan beban listrik BTS pada kondisi paparan sinar matahari normal adalah sebagai berikut:
 - Solusi L dengan total emisi terendah, beban listrik BTS hanya dipasok oleh sistem panel

surya dan baterai (100%). Total biaya energi sebesar Rp 115.124.463 dan emisi karbon yang dihasilkan 734.23 kg CO₂.

- Solusi C dengan titik solusi pada median dari *Pareto front* (keadaan seimbang), nilai proporsinya adalah 82% dari sistem panel surya dan baterai, 17% dari PLN, dan 1% dari generator diesel. Total biaya energi sebesar Rp 109.361.177 dan emisi karbon yang dihasilkan 2651.12 kg CO₂.
- Solusi R dengan total biaya terendah, nilai proporsinya adalah 62% dari sistem panel surya dan baterai, 35% dari PLN dan 3% dari generator diesel. Total biaya energi sebesar Rp 102.079.479 dan emisi karbon yang dihasilkan 4518,21 kg CO₂.

5. Nilai proporsi hasil dari proses optimasi pemenuhan beban listrik BTS pada kondisi paparan sinar matahari minimal adalah sebagai berikut:

- Solusi L dengan total emisi terendah, beban listrik BTS hanya dipasok oleh sistem panel surya dan baterai (100%). Total biaya energi sebesar Rp 123.036.021 dan emisi karbon yang dihasilkan 734.18 kg CO₂.
- Solusi C dengan titik solusi pada median dari *Pareto front* (keadaan seimbang), nilai proporsinya adalah 85% dari sistem panel surya dan baterai dan 15% dari PLN. Total biaya energi sebesar Rp 116.063.839, dan emisi karbon yang dihasilkan 2417 kg CO₂.

- Solusi R dengan total biaya terendah, nilai proporsinya adalah 55% dari sistem panel surya dan baterai, 33% dari PLN dan 12% dari generator diesel. Total biaya energi sebesar Rp 107.612.023 dan emisi karbon yang dihasilkan 6044.49 kg CO₂.

7.2 Saran

Dari pengerjaan tugas akhir ini masih terdapat hal-hal yang dapat diperbaiki lagi. Untuk pengembangan penelitian kedepannya dapat ditambahkan faktor lainnya yang dapat mempengaruhi hasil optimasi pada konfigurasi sistem tenaga hibrida, seperti kondisi ketahanan baterai, pengaruh pengisian baterai, kondisi cuaca harian dan lain sebagainya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suyanto, Soft Computing, Bandung: Informatika, 2008.
- [2] Telkom Indonesia, Laporan Keberlanjutan 2011 (Social Responsibility), 2011.
- [3] G. Fettweis dan E. Zimmermann, "ICT Energy Consumption-trends and Challenges," dalam *Proc. of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2008.
- [4] M. Marsan, "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks," dalam *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2009.
- [5] W. Vereecken, W. V. Heddeghem, M. Deruyck, B. Puype dan B. Lannoo, "Power Consumption in Telecommunication Networks: Overview and Reduction Strategies," 2010.
- [6] M. Mahmoud dan I. Ibrik, "Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , pp. 128-138, 2006.
- [7] B. Bala dan S. Siddique, "Optimal design of a PVdiesel hybrid system for electrification of an isolated island-sandwip in Bangladesh using genetic algorithm," *Energy for Sustainable Development 13*, pp. 137-142, 2009.

- [8] Telkomsel, "Our Company," 2008. [Online]. Available: <http://www.telkomsel.com/>. [Diakses 17 January 2015].
- [9] DESDM, Kebijakan Energi Nasional 2003-2020, Jakarta: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2004.
- [10] A. Sugiyono, "Prospek Penggunaan Teknologi Bersih untuk Pembangkit Listrik dengan," *Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol.1, No.1*, pp. 90-95, 2000.
- [11] A. R. Mishra, Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation, England: John Wiley & Sons, 2004.
- [12] G. Heine, GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation, Boston: Artech House, 1999.
- [13] N. Faruk, A. A.A, M. M.Y, O. L.A, A. A, A. J dan M. O, "Powering Cell Sites for Mobile Cellular Systems using Solar Power," *International Journal of Engineering and Technology Volume 2 No.5*, 2012.
- [14] Margot, T. Emeric, J. Wout dan M. Luc, "Modelling and optimization of power consumption in wireless access network," 2011.
- [15] GIZ, "PV-Hybrid Systems in Indonesia," dalam *PEP Information Workshop*, Berlin, 2013.
- [16] PT PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik tahun 2013-2022, pg 91, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik tahun 2013-2022, hal 91," 2013.
- [17] A. Konak, D. W. Coit dan A. E. Smith, "Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms: A tutorial," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 992-1007, 2006.

- [18] NASA, "Atmospheric Data Center," [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse>. [Diakses 2 June 2015].
- [19] Green Rhino Energy Ltd, "Modelling Solar Irradiation," Green Rhino Energy Ltd, [Online]. Available: <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/modelling.php>. [Diakses 15 June 2015].
- [20] RPC, "BAE-Secura PVV Gel Cell Solar Batteries," [Online]. Available: <http://www.rpc.com.au/catalog/bae-secura-pvv-gel-cell-solar-batteries-f-131.html>. [Diakses 12 June 2015].
- [21] Bank Indonesia, "Suku Bunga Dasar Kredit," [Online]. Available: <http://www.bi.go.id/id/perbankan/suku-bunga-dasar/Default.aspx>. [Diakses 10 June 2015].
- [22] A. E. FTHENAKIS V., "Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004–early 2005 status," *Res. Appl.*, vol. 14, no. Prog. Photovolt, p. pp. 275–280, 2006.
- [23] H. T. H. S. DONES R., "Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview," *Elsevier Encycl. Energy*, vol. 3, p. 77–95, 2004.
- [24] K. Deb, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. VI, pp. 182–197, 2012.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A
HASIL *GAMULTIOBJ* SKENARIO UJI COBA

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel A - 1 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 50$

Index	X1	X2	X3	Y1	2	F1	F2
1	0,97	0,03	0,01	3	3	Rp115.960.857	1096,43
2	0,97	0,03	0,01	3	3	Rp115.960.857	1096,43
3	0,95	0,04	0,01	3	3	Rp114.889.316	1277,87
4	0,94	0,06	0	3	3	Rp114.482.173	1442,19
5	0,92	0,07	0,01	3	3	Rp113.894.888	1615,98
6	0,91	0,08	0,01	2	3	Rp113.510.407	1727,01
7	0,88	0,1	0,02	2	3	Rp112.734.785	2067,01
8	0,87	0,12	0,01	2	3	Rp112.025.562	2257,32
9	0,85	0,13	0,02	2	3	Rp110.988.966	2451,34
10	0,83	0,15	0,02	2	3	Rp110.367.304	2754,96
11	0,81	0,17	0,02	2	3	Rp110.027.424	2935,45
12	0,79	0,18	0,03	2	3	Rp109.027.576	3118,07
13	0,79	0,19	0,03	2	3	Rp107.969.445	3230,01
14	0,77	0,21	0,02	2	3	Rp107.452.388	3400,64
15	0,75	0,22	0,03	2	3	Rp107.072.870	3594,57
16	0,73	0,24	0,03	2	3	Rp105.711.313	3841,94
17	0,68	0,27	0,05	2	3	Rp104.443.618	4529,65
18	0,67	0,28	0,05	2	3	Rp104.294.803	4635,41

Tabel A - 2 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 75$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	2	3	Rp116.692.448	734,25
2	1	0	0	2	3	Rp116.303.636	734,25
3	0,99	0,01	0	2	3	Rp114.860.189	846,93
4	0,98	0,02	0	2	3	Rp114.538.106	994,6
5	0,97	0,03	0	2	3	Rp114.337.894	1098,24
6	0,96	0,04	0	2	3	Rp114.141.383	1208,06
7	0,95	0,05	0,01	3	3	Rp113.892.482	1336,59
8	0,93	0,06	0	2	3	Rp113.650.370	1491,72
9	0,92	0,08	0	2	3	Rp113.315.502	1687,71
10	0,9	0,09	0	2	3	Rp113.144.530	1831,96
11	0,9	0,1	0,01	3	3	Rp112.965.205	1904,44
12	0,89	0,11	0,01	3	3	Rp112.574.331	2058,79
13	0,88	0,11	0,01	3	4	Rp111.862.273	2119,34
14	0,87	0,12	0,02	2	4	Rp111.289.520	2244,21
15	0,86	0,13	0,01	3	4	Rp110.882.781	2341,35
16	0,84	0,14	0,02	2	4	Rp110.203.669	2596,38
17	0,83	0,15	0,02	2	4	Rp109.992.869	2665,95
18	0,82	0,17	0,02	2	4	Rp109.367.764	2839,56
19	0,81	0,17	0,02	2	4	Rp108.859.546	2911,18
20	0,78	0,19	0,03	3	4	Rp108.291.469	3328,76
21	0,76	0,2	0,03	2	3	Rp107.675.703	3515,68
22	0,73	0,23	0,04	2	3	Rp106.777.120	3886,79
23	0,69	0,25	0,07	2	3	Rp105.987.956	4456,75
24	0,67	0,26	0,07	2	3	Rp105.172.319	4653,59
25	0,66	0,27	0,08	2	3	Rp105.046.217	4784,07
26	0,63	0,29	0,09	2	3	Rp104.282.341	5163,37
27	0,63	0,29	0,09	2	3	Rp104.282.341	5163,37

Tabel A - 3 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	2	3	Rp116.348.657	745,35
2	1	0	0	2	3	Rp115.569.989	748,77
3	0,99	0,01	0	3	3	Rp115.361.611	816,76
4	0,98	0,02	0	2	3	Rp114.702.309	912,62
5	0,97	0,02	0	3	3	Rp114.469.914	1019,48
6	0,96	0,04	0	2	3	Rp114.076.475	1157,47
7	0,96	0,04	0	3	3	Rp113.936.347	1207,72
8	0,95	0,05	0	2	3	Rp113.757.313	1308,12
9	0,94	0,06	0	3	4	Rp113.344.505	1407,53
10	0,94	0,06	0,01	3	4	Rp113.224.674	1433,93
11	0,93	0,07	0,01	3	4	Rp112.991.180	1566,11
12	0,92	0,08	0,01	3	4	Rp112.792.705	1667,02
13	0,91	0,09	0	3	4	Rp112.222.499	1795,89
14	0,9	0,09	0,01	3	4	Rp111.979.148	1873,97
15	0,9	0,1	0,01	3	4	Rp111.841.457	1907,08
16	0,89	0,11	0	3	4	Rp111.545.345	2009,8
17	0,88	0,11	0	2	4	Rp110.940.021	2084,3
18	0,88	0,12	0	3	4	Rp110.812.509	2154,14
19	0,87	0,13	0	3	4	Rp110.579.512	2216,95
20	0,86	0,14	0	3	4	Rp110.382.661	2331,5
21	0,85	0,15	0	2	4	Rp110.152.409	2446,33
22	0,84	0,15	0	3	4	Rp109.826.418	2548,46
23	0,83	0,16	0	3	4	Rp109.180.509	2622,4
24	0,83	0,17	0	2	4	Rp108.955.362	2712,19
25	0,82	0,18	0	3	4	Rp108.794.327	2769,42
26	0,81	0,18	0	3	4	Rp108.545.776	2874,96
27	0,8	0,19	0,01	3	4	Rp107.723.854	2987,83
28	0,8	0,2	0,01	3	4	Rp107.180.087	3039,64
29	0,79	0,2	0,01	3	4	Rp106.877.448	3108,17
30	0,79	0,2	0,01	3	4	Rp106.812.915	3136,4
31	0,78	0,21	0,01	3	4	Rp105.966.100	3338,32
32	0,77	0,22	0,01	3	4	Rp105.457.204	3399,05
33	0,76	0,22	0,01	3	4	Rp105.224.137	3469,92
34	0,74	0,24	0,02	3	3	Rp104.681.870	3782,23
35	0,71	0,25	0,04	3	3	Rp104.628.743	4137,31

Tabel A - 4 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,1$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	0,99	0,01	0	4	3	Rp116.264.949	874,86
2	0,99	0,01	0	4	3	Rp116.251.326	888,04
3	0,97	0,03	0	4	3	Rp115.222.315	1051,46
4	0,97	0,03	0	4	3	Rp115.173.342	1064,34
5	0,95	0,05	0	3	3	Rp114.847.858	1305,2
6	0,94	0,06	0	4	3	Rp114.154.600	1370,84
7	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.606.706	1484,47
8	0,92	0,07	0	4	3	Rp113.189.760	1599,43
9	0,91	0,09	0	3	3	Rp112.947.119	1748,29
10	0,9	0,1	0	3	3	Rp112.708.211	1863,8
11	0,89	0,11	0	3	3	Rp112.532.941	1964,61
12	0,88	0,12	0	3	3	Rp112.284.793	2093,59
13	0,87	0,13	0	3	3	Rp111.522.011	2176,76
14	0,86	0,14	0	3	3	Rp110.394.220	2325,2
15	0,85	0,14	0	3	3	Rp110.085.660	2385,93
16	0,85	0,15	0	3	3	Rp109.648.933	2480,85
17	0,84	0,15	0	4	3	Rp108.860.204	2527,22
18	0,83	0,17	0	3	3	Rp108.614.692	2677,24
19	0,83	0,17	0	3	3	Rp108.414.728	2718,46
20	0,81	0,19	0	3	4	Rp107.914.998	2889,38
21	0,79	0,21	0	3	3	Rp107.681.153	3143,96
22	0,77	0,22	0	2	3	Rp107.431.969	3336,64
23	0,77	0,23	0	3	3	Rp107.365.362	3349,68
24	0,75	0,25	0	3	3	Rp105.094.978	3596,05
25	0,75	0,25	0	3	3	Rp105.027.343	3609,22
26	0,74	0,26	0	3	3	Rp103.716.982	3711,37
27	0,73	0,27	0	3	3	Rp103.429.114	3846,03
28	0,71	0,28	0	3	3	Rp103.202.676	3999,33
29	0,71	0,29	0	3	3	Rp102.468.567	4093,14
30	0,7	0,3	0	3	3	Rp102.316.209	4188,62
31	0,69	0,3	0	3	3	Rp102.047.023	4259,77
32	0,66	0,33	0,01	3	3	Rp101.235.075	4661,24
33	0,64	0,34	0,01	3	3	Rp100.777.906	4851,28
34	0,63	0,35	0,01	3	3	Rp100.449.794	4972,14
35	0,63	0,35	0,01	3	3	Rp100.449.794	4972,14

Tabel A - 5 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,2$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	3	3	Rp115.058.455	734,28
2	1	0	0	3	3	Rp115.058.455	734,28
3	0,99	0,01	0	3	3	Rp114.734.702	876,85
4	0,98	0,02	0	3	3	Rp114.566.325	971,36
5	0,96	0,03	0	3	3	Rp114.238.952	1133,47
6	0,95	0,04	0	3	3	Rp114.125.791	1212,52
7	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.747.510	1418,01
8	0,93	0,07	0	3	3	Rp113.546.125	1526,54
9	0,92	0,08	0	3	3	Rp113.302.931	1639,99
10	0,91	0,09	0	2	3	Rp113.080.804	1793,26
11	0,9	0,1	0	3	3	Rp112.640.351	1904,53
12	0,88	0,12	0	3	3	Rp112.244.350	2079,33
13	0,88	0,12	0	3	3	Rp112.136.562	2138,43
14	0,86	0,13	0	3	4	Rp111.173.447	2267,15
15	0,86	0,14	0	4	4	Rp111.069.686	2334,24
16	0,84	0,15	0	4	4	Rp108.680.070	2539,72
17	0,83	0,17	0	2	4	Rp107.679.936	2664,11
18	0,83	0,17	0	3	4	Rp107.440.177	2695,85
19	0,82	0,18	0	3	4	Rp107.284.676	2811,17
20	0,81	0,19	0	3	4	Rp107.100.483	2925,03
21	0,79	0,2	0	3	4	Rp106.863.127	3088,55
22	0,78	0,22	0	3	4	Rp106.620.035	3268,2
23	0,77	0,22	0	3	4	Rp106.495.386	3348,83
24	0,75	0,23	0,01	2	4	Rp105.660.069	3554,61
25	0,75	0,24	0,01	3	4	Rp105.515.206	3591,12
26	0,74	0,25	0,01	3	4	Rp105.380.187	3752,96
27	0,73	0,26	0,01	3	4	Rp105.197.996	3866,7
28	0,71	0,27	0,01	3	4	Rp104.488.146	4009,32
29	0,71	0,28	0,01	3	3	Rp103.824.306	4100,62
30	0,69	0,3	0,01	3	3	Rp103.419.074	4243,15
31	0,69	0,3	0,01	3	3	Rp103.139.781	4306,35
32	0,68	0,31	0,01	2	3	Rp102.929.008	4481,99
33	0,67	0,32	0,01	3	3	Rp102.580.814	4547,79
34	0,64	0,33	0,03	3	3	Rp101.507.719	4873,91
35	0,64	0,33	0,03	3	3	Rp101.464.440	4894,79

Tabel A - 6 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,3$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	2	3	Rp115.124.463	734,23
2	1	0	0	2	3	Rp115.124.463	734,23
3	0,99	0,01	0	3	3	Rp114.736.922	868,91
4	0,98	0,02	0	3	3	Rp114.637.268	914,33
5	0,96	0,03	0	3	3	Rp114.236.682	1131,46
6	0,96	0,04	0	3	3	Rp114.146.075	1183,73
7	0,94	0,06	0	2	3	Rp113.826.611	1395,61
8	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.765.201	1410,71
9	0,93	0,07	0	3	4	Rp113.259.652	1571,04
10	0,92	0,07	0	3	4	Rp113.178.450	1588
11	0,91	0,09	0	2	3	Rp112.915.251	1791,1
12	0,9	0,1	0	3	3	Rp112.732.805	1877,86
13	0,89	0,11	0	3	4	Rp112.386.120	1990,98
14	0,88	0,11	0	3	4	Rp111.999.328	2051,91
15	0,87	0,12	0	3	4	Rp111.475.507	2175,67
16	0,85	0,14	0	3	4	Rp110.173.423	2398,11
17	0,85	0,14	0	3	4	Rp109.947.043	2426,92
18	0,83	0,16	0,01	3	3	Rp109.361.177	2651,12
19	0,82	0,16	0,01	2	4	Rp108.623.716	2757,78
20	0,82	0,17	0,01	3	4	Rp108.228.199	2815,1
21	0,81	0,18	0,01	3	4	Rp108.034.048	2920,43
22	0,8	0,19	0,01	3	3	Rp107.934.430	3061,15
23	0,79	0,2	0,01	3	4	Rp107.717.601	3179,12
24	0,77	0,22	0,01	2	3	Rp106.990.005	3391,9
25	0,76	0,23	0,01	2	3	Rp106.846.987	3464,34
26	0,76	0,23	0,01	3	3	Rp106.359.426	3490,59
27	0,75	0,23	0,01	3	4	Rp105.598.810	3650,15
28	0,73	0,26	0,02	3	3	Rp104.687.636	3911,3
29	0,72	0,26	0,01	3	3	Rp104.541.353	3942,07
30	0,71	0,27	0,01	3	3	Rp104.366.147	4045,3
31	0,71	0,28	0,02	2	3	Rp103.489.214	4137,9
32	0,7	0,29	0,02	2	3	Rp102.478.649	4263,06
33	0,69	0,29	0,02	2	3	Rp102.337.348	4328,93
34	0,68	0,3	0,02	3	3	Rp102.084.285	4482,87
35	0,67	0,31	0,02	2	3	Rp102.079.479	4518,21

Tabel A - 7 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,4$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	3	3	Rp115.068.629	734,2
2	1	0	0	3	3	Rp115.068.629	734,2
3	0,99	0,01	0	3	3	Rp114.791.502	825,95
4	0,98	0,02	0	3	3	Rp114.519.712	971,25
5	0,96	0,03	0	4	3	Rp114.266.966	1102,96
6	0,95	0,05	0	3	3	Rp114.036.648	1263,13
7	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.784.472	1372,76
8	0,93	0,07	0	4	3	Rp113.618.106	1514,1
9	0,92	0,08	0	3	3	Rp113.397.489	1639,15
10	0,91	0,09	0	4	3	Rp113.214.902	1733,66
11	0,9	0,1	0	2	3	Rp112.925.417	1895,08
12	0,89	0,11	0	3	3	Rp112.692.117	1985,97
13	0,88	0,11	0	3	3	Rp112.556.370	2050,52
14	0,87	0,13	0	2	3	Rp112.246.525	2228,27
15	0,86	0,13	0	3	3	Rp112.163.504	2274,72
16	0,85	0,14	0	4	3	Rp111.929.248	2403,12
17	0,85	0,15	0	3	3	Rp111.182.039	2453,61
18	0,84	0,16	0	3	3	Rp109.992.356	2576,92
19	0,83	0,16	0	3	4	Rp109.316.859	2616,66
20	0,82	0,18	0	3	4	Rp108.959.062	2778,85
21	0,82	0,18	0	4	3	Rp108.473.818	2830,73
22	0,8	0,19	0	3	3	Rp108.364.086	2976,28
23	0,8	0,2	0	3	3	Rp108.063.773	3055,75
24	0,78	0,21	0	3	3	Rp107.832.329	3209,04
25	0,77	0,22	0,01	3	3	Rp107.677.800	3319,09
26	0,76	0,23	0,01	3	4	Rp106.642.491	3457,9
27	0,75	0,25	0,01	3	4	Rp106.445.195	3644,43
28	0,74	0,25	0,01	3	4	Rp106.248.998	3715,14
29	0,73	0,26	0,01	3	3	Rp103.961.125	3899,29
30	0,72	0,27	0,01	3	3	Rp103.372.064	3960,63
31	0,71	0,28	0,01	2	3	Rp102.976.275	4112,22
32	0,69	0,29	0,01	3	3	Rp102.611.360	4246,31
33	0,67	0,31	0,02	3	3	Rp101.981.778	4575,32
34	0,56	0,36	0,09	3	3	Rp101.147.139	5970,74
35	0,56	0,36	0,09	3	3	Rp101.147.139	5970,74

Tabel A - 8 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,5$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	3	3	Rp115.866.591	734,24
2	1	0	0	2	3	Rp115.861.466	734,28
3	0,98	0,02	0	2	3	Rp115.444.483	913,76
4	0,98	0,02	0	2	3	Rp114.657.840	914,45
5	0,97	0,02	0	2	3	Rp114.471.369	1026,63
6	0,96	0,04	0	2	3	Rp114.234.468	1139,59
7	0,95	0,05	0	2	3	Rp113.951.149	1284,21
8	0,94	0,05	0	3	3	Rp113.547.026	1378,13
9	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.508.151	1387,31
10	0,93	0,07	0	2	3	Rp113.195.378	1507,63
11	0,92	0,08	0	3	3	Rp113.066.009	1581,66
12	0,91	0,08	0	3	3	Rp112.934.938	1691,73
13	0,91	0,09	0	2	3	Rp112.751.338	1778,6
14	0,9	0,1	0	3	3	Rp112.165.921	1878,54
15	0,9	0,1	0	3	3	Rp112.148.311	1896,48
16	0,89	0,11	0	2	3	Rp111.791.285	2007,57
17	0,88	0,12	0	2	3	Rp111.601.480	2113,1
18	0,87	0,13	0	3	3	Rp111.477.731	2169,6
19	0,86	0,14	0	2	3	Rp111.335.178	2317,54
20	0,86	0,14	0	2	3	Rp111.225.514	2337,19
21	0,85	0,15	0	2	3	Rp110.992.367	2441,37
22	0,85	0,15	0	3	3	Rp110.962.266	2447,88
23	0,83	0,16	0,01	3	3	Rp109.635.724	2660,27
24	0,83	0,17	0,01	3	3	Rp109.555.586	2708,43
25	0,82	0,17	0	3	3	Rp108.938.193	2792,12
26	0,82	0,18	0,01	2	3	Rp108.812.194	2863,77
27	0,81	0,18	0,01	3	3	Rp107.891.224	2908,91
28	0,8	0,19	0,01	2	3	Rp107.754.585	2977,72
29	0,78	0,21	0,02	3	4	Rp106.939.456	3318,49
30	0,78	0,2	0,02	3	4	Rp106.651.723	3331,2
31	0,76	0,21	0,03	2	4	Rp106.071.244	3602,33
32	0,73	0,23	0,04	2	4	Rp105.418.890	3925,29
33	0,72	0,23	0,04	2	4	Rp105.161.947	3984,62
34	0,67	0,26	0,07	2	4	Rp104.766.132	4636,21
35	0,67	0,26	0,07	2	4	Rp104.660.371	4688,47

Tabel A - 9 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,6$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	0,99	0,01	0	3	3	Rp115.036.748	903,66
2	0,98	0,02	0	3	3	Rp114.909.844	947,96
3	0,97	0,02	0	3	3	Rp114.665.498	1039,8
4	0,96	0,04	0	3	3	Rp114.352.378	1193,6
5	0,95	0,05	0	3	3	Rp114.134.131	1307,01
6	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.945.494	1430,22
7	0,93	0,07	0	3	3	Rp113.799.590	1525,08
8	0,92	0,07	0,01	3	3	Rp113.602.227	1610,46
9	0,92	0,07	0,01	4	4	Rp113.349.477	1703,29
10	0,9	0,08	0,01	3	3	Rp113.217.295	1823,76
11	0,89	0,09	0,01	3	3	Rp112.661.251	1951,58
12	0,89	0,1	0,01	3	3	Rp112.581.225	2024,1
13	0,88	0,11	0,01	3	3	Rp112.377.240	2092,35
14	0,87	0,11	0,01	3	3	Rp112.196.086	2178,96
15	0,87	0,12	0,01	3	3	Rp112.013.449	2243,83
16	0,86	0,13	0,01	3	3	Rp111.806.526	2320,73
17	0,85	0,14	0,01	4	3	Rp111.641.431	2388,35
18	0,85	0,14	0,01	3	3	Rp111.434.673	2425,58
19	0,82	0,17	0,01	3	3	Rp109.002.166	2761,24
20	0,82	0,17	0,01	4	3	Rp108.919.082	2775,56
21	0,82	0,18	0,01	4	4	Rp107.993.234	2834,02
22	0,81	0,18	0,01	3	4	Rp107.019.877	2901,75
23	0,79	0,2	0,01	3	3	Rp106.776.694	3110,8
24	0,79	0,2	0,01	3	3	Rp106.673.574	3128,44
25	0,78	0,22	0,01	3	3	Rp106.333.236	3292,95
26	0,78	0,22	0,01	3	3	Rp106.307.495	3294,43
27	0,76	0,23	0,01	3	3	Rp106.103.800	3486,62
28	0,75	0,23	0,01	4	3	Rp105.997.026	3541,2
29	0,74	0,24	0,01	4	3	Rp105.854.245	3657,09
30	0,74	0,25	0,01	3	3	Rp105.721.975	3733,59
31	0,7	0,27	0,03	3	3	Rp104.821.526	4218,65
32	0,69	0,27	0,03	3	4	Rp103.958.595	4318,33
33	0,69	0,28	0,03	3	4	Rp103.944.222	4333,19
34	0,67	0,29	0,04	4	3	Rp102.848.624	4573,94
35	0,65	0,29	0,05	3	3	Rp102.604.048	4799,29

Tabel A - 10 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,7$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	0,97	0,03	0	4	3	Rp115.195.970	1068,73
2	0,96	0,04	0	3	3	Rp113.777.613	1196,8
3	0,94	0,06	0	3	3	Rp113.314.417	1374,56
4	0,93	0,07	0	3	3	Rp112.960.104	1579,99
5	0,95	0,05	0	3	3	Rp114.716.876	1305,11
6	0,93	0,07	0	3	3	Rp114.248.243	1531,19
7	0,92	0,07	0	3	3	Rp114.216.334	1578,28
8	0,9	0,09	0	2	3	Rp112.497.408	1788,21
9	0,88	0,11	0,01	2	3	Rp111.599.185	2062,15
10	0,88	0,12	0	3	3	Rp111.196.522	2132,98
11	0,89	0,11	0	3	3	Rp112.079.142	2017,33
12	0,88	0,11	0,01	3	3	Rp112.025.492	2084,4
13	0,87	0,13	0	2	3	Rp111.843.982	2185,63
14	0,83	0,16	0,01	3	3	Rp109.473.763	2697,62
15	0,88	0,12	0	3	3	Rp112.940.877	2094,09
16	0,87	0,12	0,01	3	3	Rp112.259.336	2204,37
17	0,84	0,15	0,01	3	3	Rp110.380.603	2581,27
18	0,85	0,14	0	3	3	Rp111.700.432	2382,84
19	0,84	0,15	0	3	3	Rp111.162.614	2575,64
20	0,8	0,2	0	2	3	Rp107.933.978	3065,68
21	0,81	0,19	0,01	2	3	Rp109.158.032	2958,99
22	0,79	0,2	0,01	3	3	Rp108.109.985	3120,57
23	0,81	0,18	0,01	3	3	Rp109.208.945	2925,34
24	0,78	0,2	0,02	3	3	Rp107.320.314	3280,01
25	0,73	0,24	0,02	3	3	Rp105.456.201	3809,36
26	0,75	0,23	0,02	3	3	Rp105.883.547	3632,76
27	0,78	0,21	0,02	3	3	Rp107.934.341	3307,91
28	0,76	0,23	0,01	2	3	Rp105.949.860	3554,42
29	0,75	0,24	0,01	3	3	Rp105.824.964	3624,62
30	0,72	0,27	0,01	3	3	Rp104.194.096	3973,38
31	0,71	0,27	0,02	3	3	Rp104.124.666	4026,56
32	0,69	0,29	0,02	3	3	Rp102.896.785	4375,56
33	0,66	0,31	0,03	3	3	Rp102.245.024	4689,33
34	0,68	0,29	0,03	3	2	Rp103.396.446	4492,12
35	0,65	0,32	0,03	2	3	Rp101.917.357	4840,03

Tabel A - 11 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,8$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	2	3	Rp116.348.657	745,35
2	1	0	0	2	3	Rp115.569.989	748,77
3	0,99	0,01	0	3	3	Rp115.361.611	816,76
4	0,98	0,02	0	2	3	Rp114.702.309	912,62
5	0,97	0,02	0	3	3	Rp114.469.914	1019,48
6	0,96	0,04	0	2	3	Rp114.076.475	1157,47
7	0,96	0,04	0	3	3	Rp113.936.347	1207,72
8	0,95	0,05	0	2	3	Rp113.757.313	1308,12
9	0,94	0,06	0	3	4	Rp113.344.505	1407,53
10	0,94	0,06	0,01	3	4	Rp113.224.674	1433,93
11	0,93	0,07	0,01	3	4	Rp112.991.180	1566,11
12	0,92	0,08	0,01	3	4	Rp112.792.705	1667,02
13	0,91	0,09	0	3	4	Rp112.222.499	1795,89
14	0,9	0,09	0,01	3	4	Rp111.979.148	1873,97
15	0,9	0,1	0,01	3	4	Rp111.841.457	1907,08
16	0,89	0,11	0	3	4	Rp111.545.345	2009,8
17	0,88	0,11	0	2	4	Rp110.940.021	2084,3
18	0,88	0,12	0	3	4	Rp110.812.509	2154,14
19	0,87	0,13	0	3	4	Rp110.579.512	2216,95
20	0,86	0,14	0	3	4	Rp110.382.661	2331,5
21	0,85	0,15	0	2	4	Rp110.152.409	2446,33
22	0,84	0,15	0	3	4	Rp109.826.418	2548,46
23	0,83	0,16	0	3	4	Rp109.180.509	2622,4
24	0,83	0,17	0	2	4	Rp108.955.362	2712,19
25	0,82	0,18	0	3	4	Rp108.794.327	2769,42
26	0,81	0,18	0	3	4	Rp108.545.776	2874,96
27	0,8	0,19	0,01	3	4	Rp107.723.854	2987,83
28	0,8	0,2	0,01	3	4	Rp107.180.087	3039,64
29	0,79	0,2	0,01	3	4	Rp106.877.448	3108,17
30	0,79	0,2	0,01	3	4	Rp106.812.915	3136,4
31	0,78	0,21	0,01	3	4	Rp105.966.100	3338,32
32	0,77	0,22	0,01	3	4	Rp105.457.204	3399,05
33	0,76	0,22	0,01	3	4	Rp105.224.137	3469,92
34	0,74	0,24	0,02	3	3	Rp104.681.870	3782,23
35	0,71	0,25	0,04	3	3	Rp104.628.743	4137,31

Tabel A - 12 Solusi *Pareto front* dengan parameter $N_{pop} = 100$, $P_c = 0,9$

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	2	2	Rp118.032.259	762,37
2	1	0	0	2	2	Rp118.032.259	762,37
3	1	0	0	2	3	Rp116.577.286	784,21
4	0,99	0,01	0	3	3	Rp116.422.620	830,43
5	0,98	0,02	0	3	3	Rp115.435.334	928,19
6	0,97	0,03	0	2	3	Rp115.218.648	1073,17
7	0,96	0,03	0,01	3	3	Rp114.862.128	1156,54
8	0,95	0,04	0,01	3	3	Rp114.385.082	1300,69
9	0,95	0,04	0,01	3	3	Rp114.305.438	1325,66
10	0,94	0,05	0,01	3	3	Rp114.142.027	1474,29
11	0,93	0,06	0,01	3	3	Rp114.084.510	1493,67
12	0,92	0,06	0,01	3	3	Rp113.748.172	1604,74
13	0,92	0,07	0,01	3	3	Rp113.605.402	1660,3
14	0,91	0,08	0,01	3	3	Rp113.443.468	1767,92
15	0,9	0,09	0,01	3	3	Rp113.268.679	1822,44
16	0,89	0,1	0,01	3	4	Rp112.485.860	1961,7
17	0,89	0,1	0,01	3	4	Rp112.315.194	2028,94
18	0,88	0,11	0,01	3	3	Rp111.582.501	2143,57
19	0,87	0,12	0,01	3	3	Rp111.181.840	2207,53
20	0,85	0,14	0,01	3	3	Rp110.552.330	2447,01
21	0,84	0,14	0,01	3	3	Rp110.365.176	2536,84
22	0,83	0,15	0,01	3	3	Rp110.187.246	2651,12
23	0,81	0,17	0,02	3	3	Rp109.705.976	2975,36
24	0,8	0,18	0,02	3	3	Rp108.778.370	3078,37
25	0,79	0,19	0,02	3	3	Rp108.260.315	3217,27
26	0,78	0,2	0,03	3	3	Rp108.248.658	3319,14
27	0,77	0,21	0,02	3	3	Rp108.052.675	3440,71
28	0,76	0,22	0,03	2	3	Rp107.917.867	3539,6
29	0,75	0,22	0,03	3	3	Rp107.457.042	3640,78
30	0,72	0,24	0,04	3	3	Rp107.065.293	4033,72
31	0,69	0,26	0,05	3	3	Rp105.344.793	4363,64
32	0,64	0,29	0,07	3	3	Rp104.940.064	4970,37
33	0,62	0,3	0,08	3	3	Rp104.526.707	5169,91
34	0,58	0,31	0,11	3	3	Rp104.364.196	5784,58
35	0,57	0,31	0,12	3	3	Rp103.528.768	5848,31

Tabel A - 13 Solusi *Pareto front* pada Kondisi Sinar Matahari Normal

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	3	3	Rp115.688.062	734,11
2	1	0	0	3	3	Rp115.688.062	734,11
3	0,99	0,01	0	2	3	Rp115.480.946	877,54
4	0,97	0,03	0	1	3	Rp115.057.002	1012,34
5	0,96	0,04	0	2	3	Rp114.842.287	1169,47
6	0,95	0,05	0	3	2	Rp114.250.511	1274,84
7	0,94	0,06	0	2	1	Rp112.974.875	1389,49
8	0,93	0,06	0	2	0	Rp112.309.119	1511,6
9	0,91	0,08	0	2	1	Rp112.045.860	1696,13
10	0,91	0,09	0	2	0	Rp111.866.210	1809,72
11	0,9	0,1	0	3	1	Rp111.788.718	1885,76
12	0,88	0,12	0	1	0	Rp111.316.035	2063,89
13	0,87	0,13	0	2	1	Rp111.108.278	2180,84
14	0,86	0,13	0	1	1	Rp110.550.284	2297,46
15	0,85	0,15	0	1	1	Rp110.282.389	2415,73
16	0,84	0,16	0	2	1	Rp110.051.993	2557,73
17	0,83	0,16	0	2	3	Rp109.065.155	2640,45
18	0,82	0,17	0	2	4	Rp108.444.697	2779,18
19	0,81	0,19	0,01	2	4	Rp108.153.402	2945,59
20	0,8	0,2	0,01	2	4	Rp107.982.874	3083,13
21	0,79	0,21	0,01	1	4	Rp107.856.660	3214,13
22	0,77	0,22	0,01	2	4	Rp107.654.708	3323,89
23	0,76	0,23	0,01	2	4	Rp107.385.351	3508,22
24	0,75	0,24	0,01	2	3	Rp106.586.354	3609,61
25	0,74	0,25	0,01	1	3	Rp106.373.879	3736,68
26	0,73	0,26	0,01	2	3	Rp105.574.456	3850,19
27	0,72	0,27	0,01	1	3	Rp104.393.571	3999,49
28	0,7	0,28	0,01	2	3	Rp104.203.796	4126,59
29	0,7	0,29	0,01	2	3	Rp104.049.258	4250,28
30	0,69	0,3	0,01	2	3	Rp103.306.850	4370,07
31	0,68	0,31	0,01	1	3	Rp102.465.999	4484,26
32	0,67	0,32	0,02	2	3	Rp102.403.841	4598,12
33	0,63	0,34	0,03	1	2	Rp101.649.344	5073,03
34	0,62	0,35	0,03	2	2	Rp101.468.060	5165,98
35	0,62	0,35	0,03	2	2	Rp101.101.449	5181,78

Tabel A - 14 Solusi *Pareto front* pada Kondisi Sinar Matahari Minimal

Index	X1	X2	X3	Y1	Y2	F1	F2
1	1	0	0	3	3	Rp123.036.021	734,18
2	1	0	0	3	3	Rp123.036.021	734,18
3	0,99	0,01	0	2	3	Rp122.874.117	865,89
4	0,98	0,02	0	2	3	Rp122.706.389	937,78
5	0,97	0,03	0	3	3	Rp122.308.640	1048,05
6	0,96	0,04	0	2	3	Rp122.058.383	1178,8
7	0,95	0,05	0	1	1	Rp120.671.712	1272,87
8	0,94	0,06	0	3	1	Rp120.400.813	1396,96
9	0,93	0,06	0	1	1	Rp119.853.033	1487,72
10	0,93	0,07	0	1	1	Rp119.319.070	1546,97
11	0,92	0,08	0	2	1	Rp118.902.224	1698,73
12	0,91	0,09	0	1	1	Rp118.681.732	1776,2
13	0,9	0,1	0	2	1	Rp118.521.879	1899,53
14	0,89	0,11	0	1	1	Rp118.052.094	1975,87
15	0,88	0,12	0	1	0	Rp117.754.829	2122,02
16	0,87	0,13	0	1	2	Rp117.026.225	2224,15
17	0,86	0,14	0	2	2	Rp116.781.030	2329,73
18	0,85	0,15	0	1	2	Rp116.063.839	2417
19	0,84	0,15	0	1	2	Rp115.520.011	2504,39
20	0,83	0,16	0	2	2	Rp115.173.313	2631,19
21	0,82	0,18	0	2	2	Rp114.895.895	2758,48
22	0,81	0,18	0	3	4	Rp114.327.668	2879,69
23	0,8	0,19	0	2	4	Rp114.016.519	3031,75
24	0,79	0,2	0	2	4	Rp113.655.367	3111,8
25	0,78	0,21	0,01	3	4	Rp113.423.583	3222,85
26	0,75	0,23	0,02	3	3	Rp112.852.848	3608,48
27	0,74	0,24	0,03	2	3	Rp111.588.886	3793,64
28	0,73	0,24	0,03	2	3	Rp111.482.437	3852,31
29	0,72	0,25	0,03	2	3	Rp110.533.729	4027,48
30	0,68	0,27	0,05	1	3	Rp110.072.605	4471,8
31	0,68	0,27	0,05	1	3	Rp109.888.148	4513,88
32	0,59	0,31	0,1	1	3	Rp108.352.210	5592,93
33	0,59	0,31	0,1	1	3	Rp107.793.666	5677,07
34	0,55	0,33	0,12	1	1	Rp107.612.023	6044,49
35	0,55	0,33	0,12	1	2	Rp107.612.023	6044,49

RIWAYAT PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 30 September 1993 anak ke-2 dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Muhammadiyah 4 Surabaya, SMP Negeri 1 Surabaya, dan SMA Negeri 2 Surabaya. Pada tahun 2011, Penulis mengikuti Seleksi Nasional Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima di jurusan Sistem Informasi FTIF - Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP

5211100068.

Selama menempuh pendidikan S1, penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa, yaitu Himpunan Mahasiswa Sistem Informasi (HMSI). Pada tahun kedua perkuliahan penulis menjadi Staff Departemen Kewirausahaan lalu dilanjutkan pada tahun ketiga menjadi Sekretaris Departemen Kewirausahaan HMSI. Selain itu di bidang akademik penulis menjadi asisten dosen, asisten praktikum dan grader untuk mata kuliah Matematika Diskrit, Kalkulus dan Aljabar Linear, dan Statistika.

Pada tahun terakhirnya di Jurusan Sistem Informasi ini penulis mengambil bidang minat Laboratorium *Decision Support System and Business Intelligence*. Penulis memiliki ketertarikan pada bidang optimasi dan peramalan.

Halaman ini sengaja dikosongkan